

---

# **Masterarbeit**

---

Herr B. Sc.  
**Sebastian Büttner**

**F<sub>2</sub>-Lasermikrostrukturierung  
von Mikrooptiken in D263T**

**2015**

# Masterarbeit

---

## **F<sub>2</sub>-Lasermikrostrukturierung von Mikrooptiken in D263T**

Autor:

**Herr B. Sc.  
Sebastian Büttner**

Studiengang:

**Lasertechnik (Master)**

Seminargruppe:

**LT13w1-M**

Erstprüfer:

**Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel**

Zweitprüfer:

**Michael Pfeifer M. Sc.**

Einreichung:

**Mittweida, 26.08.2015**

# MASTER THESIS

---

## **F<sub>2</sub>-laser microstructuring of microoptics in D263T**

author:

**Mr. B.Sc.  
Sebastian Büttner**

course of studies:

**Laser Technology**

seminar group:

**LT13w1-M**

first examiner:

**Prof. Dr. rer. nat. Steffen Weißmantel**

second examiner:

**Michael Pfeifer, M.Sc.**

submission:

**Mittweida, 26.08.2015**

## **Bibliografische Beschreibung:**

Büttner, Sebastian:

F<sub>2</sub>-Lasermikrostrukturierung von Mikrooptiken in D263T. - 2015. - XVIII, 76, xv S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik,  
Masterarbeit, 2015

## **Referat**

Das Thema der vorliegenden Masterarbeit ist die Herstellung von Fresnel-Zylinderlinsen mittels Fluorlasermikrostrukturierung im Maskenprojektionsverfahren. Anhand einer, nach den theoretischen Grundlagen berechneten, Fresnel-Linse erfolgt die Berechnung von Maskengeometrien auf Basis zweier unterschiedlicher Methoden. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Optimierung der Maskengeometrie vorgestellt, mit denen die Funktion der Masken verbessert werden kann. Durch die Korrektur ist die Herstellung von Fresnel-Zylinderlinsen mit definiertem Krümmungsradius möglich.

### Danksagung

Ich möchte mich bei all denen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Masterarbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt Prof. Weißmantel und meinem Betreuer Herrn Pfeifer, die mir die Mittel für die Anfertigung dieser Arbeit bereitstellten und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Des Weiteren bedanke ich mich besonders bei Falko Jahn und Markus Olbrich für die vielen Tipps und Ratschläge, sowie den Mitarbeitern des Laserinstitut Hochschule Mittweida für ihre Unterstützung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Formelzeichen .....</b>	<b>XIV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Technik .....	2
1.2 Aufgabenstellung.....	6
<b>2 Grundlagen .....</b>	<b>7</b>
2.1 Laseranlage .....	7
2.1.1 F <sub>2</sub> -Laser .....	7
2.1.2 Strahlführung und -formung.....	7
2.1.3 Anlagentechnik.....	10
2.2 Lasermikrostrukturierung .....	11
2.2.1 Maskenprojektionsverfahren.....	11
2.2.2 Erzeugung eines Flächenabtrags .....	12
2.3 Fresnel-Linse .....	13
2.3.1 Funktion .....	13
2.3.1 Das Fresnel-Kirchhoffsche Beugungsintegral .....	20
<b>3 Material und Methoden .....</b>	<b>22</b>
3.1 Material .....	22
3.1.1 D263T (Borosilikatglas) .....	22
3.2 Methoden .....	24
3.2.1 Berechnungsmethode 1 .....	24
3.2.2 Berechnungsmethode 2 .....	29
3.2.3 Simulation mit berechneten Masken .....	31
3.2.4 Auswertung strukturierter Linsen .....	33
3.2.5 Berechnung und Messung der optischen Wirkung.....	35
3.2.6 Nachbehandlung der Strukturen.....	39
3.3 Fresnel-Linse und Masken-Designs .....	40
<b>4 Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>42</b>
4.1 Ergebnisse der Simulation.....	42
4.1.1 cos-Maske.....	42
4.1.2 Teilkreismaske .....	44
4.2 Ergebnisse der Strukturierungsversuche .....	46
4.2.1 cos-Maske.....	46
4.2.2 Teilkreismaske .....	51

Inhaltsverzeichnis	VII
4.3 Anpassung der Maskengeometrie .....	55
4.3.1 Berechnungen zur Korrektur.....	55
4.3.2 Strukturierung mit angepassten Masken .....	59
4.4 Ergebnisse der Nachbehandlung .....	67
4.4.1 Trockeneisreinigung .....	67
4.4.2 Ionenstrahlpolieren .....	70
4.4.3 Ätzen .....	73
<b>5 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>75</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>v</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>	<b>xv</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Fluorlasermikrostrukturiertes DPE (Mikroskop-Aufnahme) [Pfe12].	6
Abbildung 1-2:	Fluorlaserstrukturierte Fresnel-Linse (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme) [Fri06].	6
Abbildung 2-1:	Schematische Darstellung des Strahlengangs der Mikrostrukturierungsanlage [Ber09].	8
Abbildung 2-2:	Schematischer Aufbau des Abschwächers [Ber09].	8
Abbildung 2-3:	Transmissionsgrad des Abschwächers [Häh06].	8
Abbildung 2-4:	Funktionsweise des Beamcombiners (links), Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [Mic05].	9
Abbildung 2-5:	Definition der Strahlrichtungen.	9
Abbildung 2-6:	Objektiv mit Schutzgasdüse [Häh06].	10
Abbildung 2-7:	Prinzip des Maskenprojektionsverfahrens.	12
Abbildung 2-8:	Prinzipielle Erzeugung eines flächigen Abtrags mit quadratischer Maske nach [Ber09].	12
Abbildung 2-9:	Prinzip der Herstellung schräger Flächen durch den Einsatz von Dreiecksmasken [Pfe12].	13
Abbildung 2-10:	Freiformmaske zur Herstellung einer sphärischen Zylinderlinse.	13
Abbildung 2-11:	Strahlengang einer Fresnel-Linse, F: Brennpunkt [Spe15].	14
Abbildung 2-12:	Phasen- und Oberflächenfunktion nach [Tur97].	15
Abbildung 2-13:	Konstruktion der Radien der Fresnel-Zonen [Tur97].	16
Abbildung 2-14:	Vierstufige Näherung einer Kinoform.	16
Abbildung 2-15:	Effizienz einer für $\lambda = 633 \text{ nm}$ ausgelegten diffraktiven Linse in Abhängigkeit von der Wellenlänge [OSh04].	17
Abbildung 2-16:	Abhängigkeit der Effizienz vom detuning parameter $\alpha$ und der linearen Abweichung $\mu$ für die 1., 2. und 3. Beugungsordnung nach Turunen [Tur97].	19
Abbildung 2-17:	Schematische Darstellung von Abstrahl- und Abbildungsfläche, nach [Olb12].	20
Abbildung 3-1:	Spektraler Transmissionsgrad D263T [Sch05].	22
Abbildung 3-2:	Abtrag pro Puls in Abhängigkeit von der Fluenz und der Pulswiederholfrequenz [Püs14].	23
Abbildung 3-3:	Gegebene Brechzahlen und Brechzahlverlauf für die ermittelten Cauchy-Koeffizienten ( $A = 1,5085$ , $B = 4,879 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}^2$ , $C = 5,296 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}^4$ ) (siehe Anhang A1).	23
Abbildung 3-4:	Linsenparameter und Winkel für die Maskenberechnung.	24
Abbildung 3-5:	Schematische Darstellung einer Matrix mit den gekennzeichneten Größen.	26
Abbildung 3-6:	Darstellung der Maskenmatrix für eine $85 \mu\text{m}$ breite Zylinderlinse in der Abbildungsebene.	27
Abbildung 3-7:	Parameter der Fresnel-Linse und äquivalente Kreissektoren.	28
Abbildung 3-8:	Darstellung der Maskenmatrix für eine Fresnel-Zylinderlinse mit zwei Zonen, (Maskenebene).	29
Abbildung 3-9:	Darstellung der Maskenmatrix einer Teilkreismaske für eine Zylinderlinse (Maskenebene).	30
Abbildung 3-10:	Darstellung der Maskenmatrix einer Teilkreismaske für eine Fresnel-Zylinderlinse mit 2 Zonen in der Maskenebene.	31



Abbildung 3-11:	Darstellung der berechneten Ergebnismatrix nach 50 Verschiebungen.....	32
Abbildung 3-12:	Darstellung der berechneten Ergebnismatrix nach 532 Verschiebungen (entspricht der Verschiebung bis Ausgangsposition wieder erreicht ist).....	32
Abbildung 3-13:	3D-Darstellung der Ergebnismatrix.....	33
Abbildung 3-14:	Profilschnitt entlang der y-Achse der Ergebnismatrix, mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion.....	33
Abbildung 3-15:	Gefilterte Oberfläche einer mittels Konfokalmikroskop aufgenommenen Fresnel-Zylinderlinse. ....	34
Abbildung 3-16:	Profilschnitt der gefilterten Oberfläche, unterteilt in 7 Bereiche. ....	34
Abbildung 3-17:	Berechneter Feldstärkeverlauf einer Fresnel-Linse in Ausbreitungsrichtung. ....	36
Abbildung 3-18:	Intensitätsverteilung des fokussierten Laserstrahls ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ , $f = 300 \text{ mm}$ ). ....	37
Abbildung 3-19:	Aufbau zur Vermessung der Brennweite der hergestellten Linsen.....	37
Abbildung 3-20:	Konfokalmikroskop-Aufnahme einer zum Laserstrahl justierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	38
Abbildung 3-21:	Konfokalmikroskop-Aufnahme im Fokus der Fresnel-Zylinderlinse (Gauwertbild). ....	38
Abbildung 3-22:	Vorrichtung zum Ionenstrahlpolieren mit Substratbewegung. ....	40
Abbildung 3-23:	Aufbau zum Ionenstrahlpolieren. Die Neutralisation erfolgt durch den Einsatz einer Elektronenquelle. ....	40
Abbildung 3-24:	3D-Darstellung eines computergenerierten Modells einer Fresnel-Zylinderlinse. ....	41
Abbildung 3-25:	Schnittdarstellung der entworfenen Fresnel-Zylinderlinse (alle Maße in $\mu\text{m}$ ). ....	41
Abbildung 3-26:	Mikroskop-Aufnahme der in Tantalfolie geschnittenen cos-Maske.....	41
Abbildung 3-27:	Mikroskop-Aufnahme der in Tantalfolie geschnittenen Teilkreismaske.....	41
Abbildung 4-1:	Krümmungsradien der Mittellinse $R_m$ und der Fresnel-Zonen $R_{z1}$ und $R_{z2}$ in Abhängigkeit vom ÜLP und der Fluenz für die cos-Maske. ....	42
Abbildung 4-2:	3D-Darstellung der mit der cos-Maske berechneten Oberfläche....	43
Abbildung 4-3:	Profilschnitt der erzeugten Oberfläche mit eingezeichneten Krümmungsradien der Zonen. ....	43
Abbildung 4-4:	Berechnete Feldstärkeverteilung (Realteil, normiert) für die Simulierte Fresnel-Zylinderlinse in der xz-Ebene ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ , $n = 1,5264$ ). ....	43
Abbildung 4-5:	Feldstärkeverteilung (Realteil, nicht normiert) in der Fokusregion der Fresnel-Zylinderlinse .....	43
Abbildung 4-6:	Radien der Mittellinse $R_m$ und der Fresnel-Zonen $R_{z1}$ und $R_{z2}$ für verschiedene Fluenzen und ÜLP für eine Teilkreismaske.....	44
Abbildung 4-7:	3D-Darstellung der mit der Teilkreismaske berechneten Oberfläche. ....	45
Abbildung 4-8:	Profilschnitt der berechneten Oberfläche mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion. ....	45

Abbildung 4-9:	Berechnete Feldstärkeverteilung (Realteil, normiert) für die mit der Teilkreismaske simulierte Fresnel-Zylinderlinse in der xz-Ebene ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ , $n = 1,5264$ ). ....	45
Abbildung 4-10:	Feldstärkeverteilung (Realteil, nicht normiert) in der Fokusregion der Fresnel-Zylinderlinse. ....	45
Abbildung 4-11:	Ermittelte Radien der Mittellinse, der 1. und der 2. Fresnel-Zone der erzeugten Fresnel-Zylinderlinsen ( $\dot{U}LP = 98 \%$ , $H = 1 - 5 \text{ J/cm}^2$ ). ....	46
Abbildung 4-12:	Profilschnitt einer strukturierten Fresnel-Zylinderlinse ( $\dot{U}LP = 98 \%$ , $H = 1,07 \text{ J/cm}^2$ ). ....	48
Abbildung 4-13:	3D-Darstellung der strukturierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	48
Abbildung 4-14:	Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der erzeugten Fresnel-Zylinderlinsen mit angepassten Parametern. ....	49
Abbildung 4-15:	Flächenrauheit der mit der cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen. ....	50
Abbildung 4-16:	Berechnete relative Feldstärkeverteilung für einen Profilschnitt der hergestellten Oberfläche ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ , $n = 1,5264$ , $\dot{U}LP = 98 \%$ , $H = 1,07 \text{ J/cm}^2$ ). ....	51
Abbildung 4-17:	Radien der mit der Teilkreismaske erzeugten Fresnel-Linsen in Abhängigkeit der ermittelten Fluenz. ....	52
Abbildung 4-18:	Profilschnitt einer mit der Teilkreismaske hergestellte Zylinderlinse ( $\dot{U}LP = 98 \%$ , $H = 6,27 \text{ J/cm}^2$ ). ....	53
Abbildung 4-19:	Berechnete Feldstärkeverteilung für die mittels Teilkreismaske hergestellte Zylinderlinse ( $\dot{U}LP = 98 \%$ , $H = 6,27 \text{ J/cm}^2$ , $n = 1,5264$ , $\lambda = 532 \text{ nm}$ ). ....	53
Abbildung 4-20:	Ermittelte Flächenrauheiten der mit der Teilkreismaske hergestellten Linsen. ....	54
Abbildung 4-21:	Darstellung der Maskenmatrix der angepassten und gestreckten cos-Maske. ....	56
Abbildung 4-22:	Darstellung des berechneten Profilschnitts mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion. ....	56
Abbildung 4-23:	Aufnahme des Strahlprofils des Fluorlaserstrahls nach Anpassung des Strahlengangs. ....	57
Abbildung 4-24:	Berechnetes Polynom 6. Ordnung zur Beschreibung des inhomogenen Abtrags. ....	57
Abbildung 4-25:	Profilschnitt einer simulierten Fresnel-Zylinderlinse mit inhomogenen Abtrag. ....	58
Abbildung 4-26:	Profilschnitt einer strukturierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	58
Abbildung 4-27:	Darstellung der Maskenmatrix der korrigierten Teilkreismaske mit inhomogenem Abtrag über die Maskenfläche. ....	59
Abbildung 4-28:	Mikroskop-aufnahme der hergestellten korrigierten Teilkreismaske. ....	59
Abbildung 4-29:	Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der mit der korrigierten cos-Maske hergestellten Fresnel-Linsen in Abhängigkeit von der Fluenz ( $\dot{U}LP = 98 \%$ ). ....	60
Abbildung 4-30:	3D-Darstellung der Konfokalmikroskop-Aufnahme der mit $H = 3,55 \text{ J/cm}^2$ und $\dot{U}LP = 98 \%$ erzeugten Fresnel-Zylinderlinse. ....	60
Abbildung 4-31:	Profilschnitt der mit $H = 3,55 \text{ J/cm}^2$ und $\dot{U}LP = 98 \%$ erzeugten Fresnel-Zylinderlinse. ....	60

Abbildung 4-32:	Gemessene Flächenrauheiten $S_q$ für die mit der korrigierte und nicht korrigierte cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz. ....	61
Abbildung 4-33:	Berechnete normierte Feldstärkeverteilung der mit $H = 3,55 \text{ J/cm}^2$ und $\ddot{U}LP = 98 \%$ erzeugten Fresnel-Zylinderlinse. ....	61
Abbildung 4-34:	Konfokalmikroskop-Aufnahme der Fokusebene $273 \mu\text{m}$ über der Substratoberfläche. ....	62
Abbildung 4-35:	Berechnete (blau) und gemessene (rot) relative Intensitätsverteilung (normiert auf gleichen Leistungseinschluss). ....	62
Abbildung 4-36:	Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der mit der angepassten Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinsen. ....	63
Abbildung 4-37:	Gemessene Flächenrauheiten $S_q$ für die mit der korrigierten und nicht korrigierten Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz. ....	64
Abbildung 4-38:	Konfokalmikroskop-Aufnahme der mit der korrigierten Teilkreismaske mit $H = 4,21 \text{ J/cm}^2$ und $\ddot{U}LP = 98 \%$ strukturierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	65
Abbildung 4-39:	Profilschnitt der mit der korrigierten Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	65
Abbildung 4-40:	Berechnete Feldstärkeverteilung der mit der Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinse ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ , $n=1,5264$ ). ....	65
Abbildung 4-41:	Konfokalmikroskop-Aufnahme der Fokusebene $250 \mu\text{m}$ über der Substratoberfläche. ....	66
Abbildung 4-42:	Berechnete (blau) und gemessene (rot) relative Intensitätsverteilung (normiert auf gleichen Leistungseinschluss). ....	66
Abbildung 4-43:	Gemessene Intensitätsverteilungen im Fokus der mit der cos-Maske (blau) und der Teilkreismaske (rot) strukturierten Fresnel-Zylinderlinse. ....	67
Abbildung 4-44:	Zylinderlinse nach der Strukturierung ( $\ddot{U}LP = 95 \%$ , $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$ ). ....	68
Abbildung 4-45:	Mit Trockeneis gereinigte Zylinderlinse, ( $\ddot{U}LP = 95 \%$ , $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$ ). ....	68
Abbildung 4-46:	Quadratisch gemittelte Flächenrauheit der mit $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$ und $\ddot{U}LP = 98 \%$ hergestellten Zylinderlinsen vor und nach der Trockeneisreinigung. ....	68
Abbildung 4-47:	Mikroskop-Aufnahme von zwei Fresnel-Zylinderlinsen nach der Trockeneisreinigung mit Ausbrüchen innerhalb der Linsenstrukturen. ....	69
Abbildung 4-48:	Mikroskop-Aufnahme der entstandenen Ausbrüche auf der Oberfläche. ....	69
Abbildung 4-49:	Flächenrauheit der hergestellten Zylinderlinsen in Abhängigkeit vom $\ddot{U}LP$ vor und nach 25 min Ionenstrahlpolieren ( $E_{\text{Ion}} = 1 \text{ keV}$ , $I_s = 25 \text{ mA}$ , $u = 20 \text{ U/min}$ ). ....	70
Abbildung 4-50:	Flächenrauheit der Fresnel-Zylinderlinsen vor und nach der Ionenstrahlpolitur ( $I_s = 105 \text{ mA}$ , $E_{\text{Ion}} = 712 \text{ eV}$ ). ....	71
Abbildung 4-51:	Mittels Kaufmann-Ionenquelle geglättete Zylinderlinse. ....	72
Abbildung 4-52:	Mittels HF-Ionenquelle geglättete Fresnel-Zylinderlinse. ....	72

---

Abbildung 4-53: Flächenrauheit der Zylinderlinsen nach Ionenbeschuss mit 85° Einfallswinkel. ....	72
Abbildung 4-54: Zylinderlinsen vor dem Ätzen. ....	73
Abbildung 4-55: Zylinderlinsen nach 10 min Ätzen mit KOH-Lösung. ....	73
Abbildung 4-56: Zylinderlinsen nach 30 min Ätzen mit KOH-Lösung. ....	73
Abbildung 4-57: Gemessene Flächenrauheit der Zylinderlinsen in Abhängigkeit vom ÜLP und der Einwirkzeit. ....	74

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Parameter des Achssystems [Mic05]. .....	11
Tabelle 2-2:	Beugungseffizienz diffraktiver optischer Elemente in Abhängigkeit von der Anzahl der Höhenstufen [OSh04]. .....	17
Tabelle 4-1:	Bereite der Zonenübergänge der hergestellten Fresnel- Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz. ....	50

## Formelzeichen

$a_1$	Koeffizient
$a_2$	Koeffizient
$a_3$	Koeffizient
$a_4$	Koeffizient
$A$	Abstrahlfläche
$A'$	Zielfläche
$A_{sub}$	Substratfläche
$b$	Streckungsfaktor
$d$	Apertur der Linse
$d_l$	Apertur der l-ten Fresnel-Zone
$d_s$	Scheitelabstand
$d_{sub}$	Substratdicke
$E$	Feldstärke
$E^*$	Komplexbesetzte Feldstärke
$E(x, y)$	Feldstärke im Punkt(x,y) der Zielfläche
$E(x', y', z)$	Feldstärkeverteilung auf Abstrahlfläche
$E_{Ion}$	Ionenenergie
$E_{Photon}$	Photonenenergie
$E_{Puls}$	Pulsenergie
$e$	Euler'sche Zahl
$\Delta e$	Elementgröße in x- und y-Richtung
$f$	Brennweite
$f_j$	von Index j abhängiger Streckungsfaktor
$f_p$	Pulswiederholfrequenz
$f_1$	Anpassungsparameter für den Maskenbereich der 1. Fresnel-Zone
$f_2$	Anpassungsparameter für den Maskenbereich der 2. Fresnel-Zone
$H$	Fluenz

---

$H_S$	Schwellfluenz
$h$	Höhe der Linse
$h(r)$	Höhenprofil der Linse in Abhängigkeit vom Radius $r$
$h'(r)$	Abweichendes Höhenprofil der Linse in Abhängigkeit vom Radius $r$
$h_{opt}$	Optimale Höhe
$h_{max}$	Maximalhöhe der Linse
$h(\gamma)$	Höhe der Linse in Abhängigkeit vom Winkel
$I$	Intensität
$I_S$	Strahlstrom Ionenstrahl
$i$	Index der Matrix in x-Richtung
$i_{max}$	normierter Funktionswert
$j$	Index der Matrix in y-Richtung
$l$	Index der Fresnel-Zonen
$l_{max}$	Anzahl der Fresnel-Zonen
$m$	Beugungsordnung
$N$	Anzahl Pulse pro Flächenelement
$N_0(x, y, z)$	Richtungsfaktor
$N_h$	Anzahl der Matrixelemente für Höhe $h$
$N_R$	Anzahl der Matrixelemente für Krümmungsradius $R$
$N_r$	Anzahl der Matrixelemente für Radius $r$
$N_{rl}$	Anzahl der Matrixelemente für Radius $r$ der $l$ -ten Zone
$N_{r(l+1)}$	Anzahl der Matrixelemente für Radius $r$ der $(l + 1)$ -ten Zone
$N_s$	Anzahl der Matrixelemente für Scheitelabstand $ds$
$n$	Brechzahl des Ausbreitungsmediums
$n'$	Brechzahl des Linsenmaterials
$n'_0, n'(\lambda_0)$	Brechzahl des Linsenmaterials für die Design-Wellenlänge $\lambda_0$
$n'(\lambda)$	Brechzahl des Linsenmaterials bei der Wellenlänge $\lambda$
$p$	Größe der Matrix in x-Richtung

$P_{max}$	maximale Leistung
$q$	Größe der Matrix in y-Richtung
$R$	Krümmungsradius der Linse
$R_a$	arithmetisch gemittelte Linienrauheit
$R_m$	Krümmungsradius der Mittellinse
$R_{z1}$	Krümmungsradius der 1. Fresnel-Zone
$R_{z2}$	Krümmungsradius der 2. Fresnel-Zone
$r$	Radius
$r_l$	Radius der l-ten Fresnel-Zone
$r_{l+1}$	Radius der (l + 1)-ten Fresnel-Zone
$S_q$	Quadratisch gemittelte Flächenrauheit
$u$	Drehzahl
$w_0$	Radius der Strahltaile
$x$	x-Koordinate
$x'$	x-Koordinate auf Zielfläche
$\Delta x$	Größe der Matrixelemente in x-Richtung
$y$	y-Koordinate
$y'$	y-Koordinate auf Zielfläche
$\Delta y$	Größe der Matrixelemente in y-Richtung
$z$	z-Koordinate
$z'$	z-Position der Zielfläche
$\Delta z$	Abstand von Abstrahl- zur Zielfläche
$\alpha$	Absorptionskoeffizient
$\beta$	Abbildungsmaßstab
$\gamma$	Öffnungswinkel der Mittellinse
$\gamma_r$	Öffnungswinkel des Kreissektors für den Radius r
$\gamma_l$	Öffnungswinkel des Kreissektors für die l-te Fresnel-Zone
$\mu$	Faktor zur Beschreibung der linearen Abweichung vom idealen Profil



---

$\eta$	Effizienz
$\Lambda(r)$	lokale Gitterperiode
$\lambda$	Wellenlänge
$\lambda_c$	Grenzwellenlänge
$\lambda_0$	Design-Wellenlänge
$\pi$	Kreiszahl
$\tau$	Pulsdauer
$\varphi$	Drehwinkel
$\Phi(r)$	Von r abhängige Phasenfunktion
$\Phi(x, y)$	Von x- und y-Koordinate abhängige Phasenfunktion

## Abkürzungsverzeichnis

CaF <sub>2</sub>	Chemisches Symbol für Kalziumfluorid
CAIBE	Chemisch unterstütztes Ionenstrahlätzen (engl. Chemically Assisted Ion Beam Etching)
DOE	Diffraktives optisches Element
DPE	Diffraktives Phasenelement
EGY NGR	Energiestabiler Modus ohne Gasaustausch (engl. Energy No Gas Replacement)
EGY PGR	Energiestabiler Modus mit Gasaustausch (engl. Energy Partial Gas Replacement)
F <sub>2</sub>	chemisches Symbol für molekulares Fluor
HF	Hochfrequenz
HV	Hochspannung (engl. High Voltage)
KOH	chemisches Symbol für Kaliumhydroxid
o.A.	optische Achse
PPD	Puls-zu-Puls-Distanz
RIBE	Reaktives Ionenstrahlätzen (engl. Reactive Ion Beam Etching)
RIE	Reaktives Ionenätzen (engl. Reactive Ion Etching)
ÜLP	Überlappingsgrad
UP	Ultrapräzession
VIS	sichtbarer Bereich des elektromagnetischen Spektrums
VUV	vakuum-ultravioletter Bereich des elektromagnetischen Spektrums
NIR	naher Infraroter Bereich des elektromagnetischen Spektrums

# 1 Einleitung

Die zunehmende Miniaturisierung technischer Geräte fordert immer neue Verfahren zur Herstellung funktioneller Baugruppen im Mikrometerbereich. Dies beschränkt sich bei Weitem nicht mehr nur auf die Elektronik, sondern auch auf optische Systeme. Besonders in der Informationsübertragung liegen Optik und Elektronik sehr nah bei einander, da moderne Übertragungssysteme auf der optischen Informationsübertragung basieren. Die Kommunikation erfolgt dabei durch die Erzeugung und Modulation von elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren (VIS) oder nahen infraroten Spektralbereich (NIR) durch den Sender, welches z.B. durch Glasfasern zum Empfänger geleitet wird. Die Modulation entspricht der Wandlung eines elektrischen in ein optisches Signal. Der Empfänger transformiert das optische Signal wieder in ein elektrisches um. Obwohl diese Art der Informationsübertragung sehr schnell ist, ist die Übertragungsrate begrenzt. Dennoch sollen immer größer werdende Datenmengen übertragen werden. Die Entwicklung der Informationsübertragung strebt nach einer fortschreitenden Vergrößerung der Datenübertragungsraten bzw. der Bandbreite von Übertragungssystemen. Dies kann unter anderem durch Miniaturisierung und Parallelisierung von Übertragungskanälen erfolgen. Dabei steigen die Anforderungen an die Optiken und deren Herstellungsverfahren mit zunehmender Miniaturisierung, da die Strukturgrößen nur wenige Größenordnungen über der Wellenlänge liegen. Die Qualität eines optischen Bauelementes wird in der Optikfertigung oft bezüglich der Design-Wellenlänge angegeben. Für qualitativ hochwertige Optiken liegen typische Formgenauigkeiten im Bereich von  $\lambda/20$  bis  $\lambda/100$ . Mit kleiner werdenden Strukturen wird es demnach immer anspruchsvoller den Anforderungen gerecht zu werden, da dies eine sehr präzise Fertigungs- und Messtechnik voraussetzt. Ein Ansatz zur Herstellung solch hochqualitativer Optiken im Mikrometerbereich bietet die Fluorlasermikrostrukturierung, ein Verfahren, welches auf Basis der Maskenprojektion arbeitet. In vergangenen Arbeiten [Pfe12, Püs14, Büt15a] konnte gezeigt werden, dass mit diesem Verfahren die Fertigung optischer Elemente mit Strukturgrößen im Mikrometerbereich möglich ist. Mikrooptische Elemente können nicht nur in lateraler Richtung verkleinert werden, sondern auch in vertikaler Richtung. Durch die Auslegung der Elemente als Fresnel-Optiken kann die Bauteilhöhe um ein Vielfaches reduziert werden, bei gleichzeitiger Verbesserung der Funktionalität z.B. durch die Korrektur chromatischer Abbildungsfehler. Die Herstellung von Fresnel-Linsen ist prinzipiell mittels Fluorlasermikrostrukturierung möglich, es erfordert jedoch Masken mit spezieller Geometrie. Am Beispiel von Fresnel-Zylinderlinsen erfolgt die Berechnung und Herstellung derartiger Masken, deren Funktion durch praktische Anwendung überprüft wird.

## 1.1 Stand der Technik

Für die Herstellung von Mikrooptiken gibt es eine Vielzahl einsetzbarer Verfahren, jedoch können nicht alle zur Strukturierung von Glaswerkstoffen eingesetzt werden. Im Folgenden soll ein Überblick über verschiedene etablierte und neue Herstellungsverfahren für Mikrooptiken gegeben werden.

### Mechanische Verfahren

Die Ultrapräzessionszerspanung (UP-Zerspanung) ist ein mechanisches Verfahren zur Bearbeitung sphärischer, asphärischer und frei geformter Flächen. Mit Hilfe von computergesteuerten Werkzeugmaschinen können Mikrostrukturen erzeugt werden, die den optischen Qualitätsanforderungen genügen. Die Strukturierung erfolgt durch spanenden Abtrag mittels Dreh- und Fräß-Werkzeugen aus monokristallinem Diamant. Die Abmaße der Werkzeuge liegen im Mikrometerbereich. Mit diesem Verfahren lassen sich Strukturen mit hoher Formgenauigkeit und sehr geringer Linienrauheit von  $R_a = 1 - 5 \text{ nm}$  erzeugen [Ris12]. Das Verfahren dient der Endbearbeitung optischer Oberflächen, wobei versucht wird eine ausreichend hohe optische Qualität ohne einen anschließenden Polierprozess herzustellen. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen laut Bliedtner et al. [Bli10] im Submikrometer- bzw. Nanometerbereich. Die dafür benötigten Maschinen müssen sehr hohen Anforderungen gerecht werden, da diese sehr anfällig auf äußere Einflüsse, wie Temperaturschwankungen und Vibrationen sind [Ris12]. Von Risse [Ris12] werden jedoch nur Metalle als Substratwerkstoff angegeben, Brecher [Bre06] und Brinkmann [Bri09] verweisen hingegen auch auf die Möglichkeit der direkten Bearbeitung von Glaswerkstoffen mit diesem Verfahren. Bliedtner et al. [Bli10] verweist speziell auf die Bearbeitung schwer spanbarer Materialien mit geometrisch bestimmter Schneide durch Schwingungsunterstützung. Das Werkzeug wird dabei zu hochfrequenten Schwingungen angeregt, wodurch Prozesskräfte und der damit einhergehende Verschleiß reduziert werden können.

Ein weiteres mechanisches Verfahren ist das ebenfalls ultraschallgestützte Schwingläppen. Das Verfahren kann dem Spanen mit undefinierter Schneide zugeordnet werden und ist für alle Werkstoffe geeignet, die zu sprödem Bruchverhalten neigen [Bli10, Klo07]. Das Grundprinzip des Abtrags beruht auf der mechanischen Wechselwirkung zwischen einem Abformwerkzeug, den Läppkörnern und dem Werkstück. Im Falle der Glasbearbeitung werden auch bei diesem Verfahren Diamantkörner eingesetzt. Das Werkzeug wird mittels Ultraschall angeregt, was zu Stoß-, Abroll und Aufschleuderungsmechanismen zwischen den beteiligten Komponenten führt. Durch diese Mechanismen werden im Werkstück Risse induziert, die zu einem Abtrag führen.

Aufgrund dessen kommt es zu einer Übertragung der Werkzeugform auf das Werkstück. Das Werkzeug, die sogenannte Sonotrode, entspricht dem Negativ der einzubringenden Struktur. Der wesentliche Nachteil des Verfahrens ist der Verschleiß der Sonotrode, da deren Form auf das Werkstück übertragen wird und deren Verschleiß Abweichungen bei der Bearbeitung verursacht [Klo07]. Die herstellbaren Strukturgrößen liegen laut Klocke et al. [Klo07] bei  $< 1$  mm, Bliedner et al. [Bli10] gibt für das Verfahren  $< 0,1$  mm an. Es ist daher anzunehmen, dass das Verfahren für Herstellung von Mikrolinsen mit einer Apertur  $< 0,1$  mm nicht die nötige Genauigkeit aufweist.

### **Lithographische Verfahren**

Die Photolithographie ist ein weitverbreitetes Verfahren zur Erzeugung von Mikrostrukturen und hat ihren Ursprung in der Halbleiterindustrie. Aufgrund des äquivalenten technologischen Ablaufs, kann das Verfahren problemlos auch auf Glaswerkstoffe angewendet werden. Im Bereich der Mikrooptik werden beispielsweise binäre und mehrstufige diffraktive Phasenelemente (DPE) hergestellt. Die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung binärer DPEs mittels Lithographie werden in [Sta02] wie folgt erläutert:

1. Beschichtung des Substrates mit dem Photolack (Spin-Coating)
2. Strukturierung durch Laserbelichtung
3. Entwickeln des Photolacks
4. Reaktives Ionenstrahlätzen

Die Herstellung binärer Optiken kann mit nur einer Maske erfolgen. Um komplexere Oberflächen zu erzeugen, ist eine mehrmalige Wiederholung der Schritte mit unterschiedlichen Masken notwendig [Bri09, OSh04]. Eine detailliertere Prozessbeschreibung befindet sich in O'Shea et al. [OSh04]. Die minimal herstellbaren lateralen Strukturgrößen der DPEs werden von Brinkmann [Bri09] mit  $0,5 \mu\text{m}$  und von O'Shea et al. [OSh04] mit  $< 0,3 \mu\text{m}$  (Projektionsbelichtung) angegeben. Es gibt eine Vielzahl an Verfahrensvarianten, allein die Belichtungstechniken können sich stark voneinander unterscheiden. Allgemein erfolgt die Übertragung der Maske mit UV-Strahlung durch Kontakt-, Proximity- oder durch die Projektionsmethode [OSh04]. Es werden aber auch schreibende Verfahren verwendet. Stankovic [Sta02] nutzt für die Herstellung der DPEs ein direkt schreibendes Laserlithographie-Verfahren und verweist auf das Verfahren der Elektronenstrahlolithographie. Des Weiteren unterscheiden sich die Verfahren durch die eingesetzte Ätztechnik. Üblicherweise werden zur Herstellung optischer Elemente Trockenätzverfahren, wie das reaktive Ionenstrahlätzen (RIBE) eingesetzt. Im Gegensatz zum nasschemischen Ätzen weist das Verfahren, bei geeigneter Ausrichtung des Ionenstrahls, eine hohe Anisotropie auf. Das bedeutet, dass sehr steile

Strukturflanken erzeugt werden können und somit eine bessere laterale Auflösung erzielt werden kann [Sta02]. Auch O'Shea et al. [OSh04] gibt die physikalisch-chemischen Ätzverfahren zu Herstellung an. Neben dem genannten Verfahren wird auf das reaktive Ionenätzen (RIE) und das chemisch gestützte Ionenstrahlätzen (CAIBE) verwiesen.

Die Herstellung von Linsen mit lithographischen Verfahren ist prinzipiell möglich. Es ergeben sich jedoch verfahrensbedingt einige Nachteile, die das Verfahren aufwendig und vor allem unrentabel machen. Die Herstellung komplexer 3D-Strukturen erfordert den Einsatz mehrerer Masken. Für jede Maske muss der gesamte Bearbeitungszyklus durchlaufen werden. Des Weiteren kann mit dem Verfahren kein kontinuierlicher Oberflächenverlauf erzeugt werden, sondern nur ein diskreter stufenförmiger Verlauf. Das bedeutet, je besser die vertikale Auflösung der Struktur sein soll, umso mehr Masken müssen eingesetzt werden.

### **Prägeverfahren**

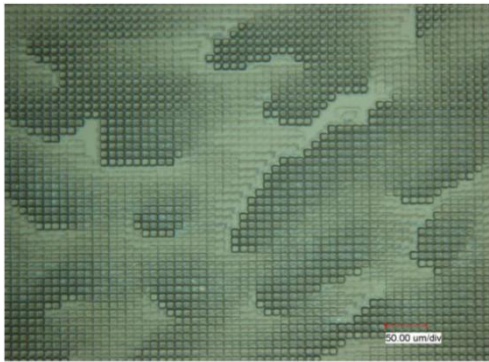
Die oben genannten Verfahren dienen nicht nur der direkten Herstellung von Mikrooptiken. Besonders wenn es darum geht, Bauelemente in größeren Stückzahlen herzustellen, kommen Replikationstechniken wie z.B. das Heißprägen zum Einsatz. Dieses Verfahren ist zumeist speziell auf Polymere ausgerichtet, kann aber auch auf Glaswerkstoffe angewendet werden. In diesem Zusammenhang wurde vom Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik ein Verfahren entwickelt, welches die flächige Mikrostrukturierung von Glas-Wafern erlaubt. Als Werkzeug kommen Prägestempel aus Siliciumcarbid zum Einsatz, in die die jeweiligen Strukturen mittels Laser-mikrostrukturierung oder UP-Zerspanung eingebracht werden. Zum Abformen wird der Prägestempel auf das erwärmte und dadurch duktile Glas gedrückt und anschließend wieder entformt. Die Glasoberfläche wird im Vorhinein beschichtet, um ein Anhaften des Glases während der Bearbeitung zu verhindern. Die Schichtmaterialien müssen duktil sowie mechanisch und chemisch stabil sein. Diesbezüglich können dünne metallische Schichten, amorphe Kohlenstoffschichten und keramische Schichten eingesetzt werden. Die herstellbaren Strukturgrößen liegen in einem Bereich von 10 µm bis 2 mm. Des Weiteren ist eine Prägetiefe von bis zu 2 mm realisierbar. Aufgrund der hohen Umformtemperatur von rund 1500 °C ist das Verfahren nicht auf Quarzglas anwendbar. Für eine derartige Hochtemperaturbearbeitung sind derzeit keine Formwerkzeuge verfügbar [Ede09].

## Reflow-Technik

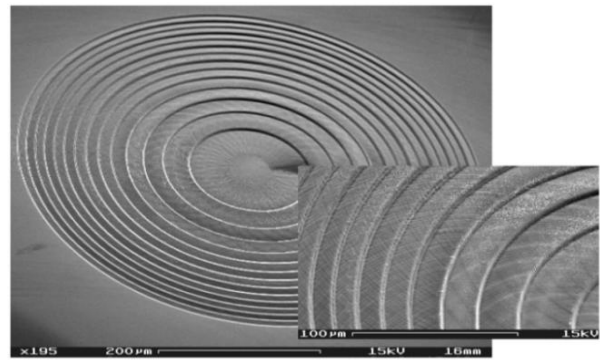
Die Herstellung von Optiken in photoempfindlichen Lackschichten mittels Laser- oder Elektronenstrahlolithographie wurde bereits ausgiebig untersucht. Diese Verfahren können jedoch nicht auf Glaswerkstoffe übertragen werden. Ein weiteres Verfahren, welches auf derartige Lackschichten angewendet wird, ist die Reflow-Resist-Technik. Bei dieser Methode werden in einem ersten Schritt Strukturen auf einem Substrat durch Belackung, Belichtung und Entwicklung des Lacks hergestellt. Danach werden die Strukturkomponenten aufgeschmolzen. Die in der Schmelze wirkende Oberflächenspannung führt zu einem kontinuierlichen Höhenprofil der Struktur [Wip05]. Prinzipiell besteht die Möglichkeit dieses Verfahren auch auf Glaswerkstoffe anzuwenden. Die Technologie zur Erzeugung eines kontinuierlichen Höhenprofils in Quarzglas ist bereits vorhanden. Diesem Prinzip folgend, konnten die Pixelflächen mehrstufiger DPEs geglättet werden. Durch die Einberechnung des Fließverhaltens der Glasschmelze kann die Herstellung von sphärischen und asphärischen Optiken realisiert werden [Büt15]. Das Verfahren kann für die Herstellung von Fresnel-Linsen, deren Zonen scharf voneinander abgegrenzt sein müssen, nicht eingesetzt werden.

## Laserverfahren

Für die direkte Strukturierung von Glas bietet die Fluorlasermikrostrukturierung eine optimale Alternative. Aufgrund der hohen Photonenenergie von  $E_{\text{Photon}} = 7,9 \text{ eV}$  ist die Bearbeitung von Dielektrika mit dem Fluorlaser möglich. Die Erzeugung von Strukturen basiert auf dem Maskenprojektionsverfahren. Der Einsatz entsprechend kleiner Masken erlaubt Herstellung von Strukturen mit Abmessungen bis in den einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich. Dabei hängt die minimale Strukturgröße von dem Auflösungsvermögen des abbildenden optischen Systems ab. Die Abbildung 1-1 zeigt ein mittels Fluorlasermikrostrukturierung hergestelltes DPE, dessen Pixel eine Größe von  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  aufweisen [Pfe12]. Durch das mehrmalige überlappende Aneinandersetzen von Einzelabträgen ist mit diesem Verfahren auch eine flächenhafte Erzeugung dreidimensionaler Strukturen möglich. Wie in Abbildung 1-2 dargestellt, konnte auf diese Weise eine Fresnel-Linse mit einem Durchmesser von  $600 \mu\text{m}$  hergestellt werden. Die äußerste Zone der Linse hat eine Breite von  $10 \mu\text{m}$  [Fri06]. Dieses Verfahren eignet sich besonders gut zur Herstellung von Prototypen, da die Prozessführung und die Anlagentechnik relativ einfach sind. Des Weiteren können auch komplexe Strukturen mit nur einer Maske hergestellt werden, was ein großer Vorteil gegenüber den lithographischen Verfahren ist.



**Abbildung 1-1:** Fluorlasermikrostrukturiertes DPE (Mikroskop-Aufnahme) [Pfe12].



**Abbildung 1-2:** Fluorlaserstrukturierte Fresnel-Linse (Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme) [Fri06].

Die Herstellung von Blaze-Gittern und Zylinderlinsen konnte mit diesem Verfahren bereits ebenfalls realisiert werden [Pfe15, Püs14, Büt15a].

## 1.2 Aufgabenstellung

Aufbauend auf vorangegangenen Arbeiten [Püs14, Büt15a] soll die Herstellung von Mikrooptiken mittels Maskenprojektionsverfahren untersucht werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Berechnung der Maskengeometrie zur Erzeugung sphärischer Zylinderlinsen mit Fresnel-Zonen. Die Überprüfung der Funktion der Masken erfolgt durch die Herstellung und Auswertung der, mit den berechneten und hergestellten Masken, erzeugten Strukturen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Erzeugung von sphärischen Oberflächen mit einem definierten Krümmungsradius. Des Weiteren soll die Wirkung der Maskengeometrie und der Bearbeitungsparameter auf die Oberflächenrauheit untersucht werden. Diesbezüglich sollen verschiedene Verfahren zur Reinigung der Linsen von Debris und deren Wirkung auf die Oberflächenrauheit untersucht werden. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse, erfolgt ggf. eine Anpassung der Maskengeometrie. Die Funktion der hergestellten Linsen soll des Weiteren optisch ausgewertet werden.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Laseranlage

Die Strukturierung der Fresnel-Zylinderlinsen erfolgt mit der Fluorlaseranlage EX-157 der Firma 3D-Micromac AG. Die Hauptkomponenten der Anlage bilden der Fluorlaser, der Strahlengang und die Bearbeitungskammer. In dieser befindet sich ein Achssystem zur Probenpositionierung.

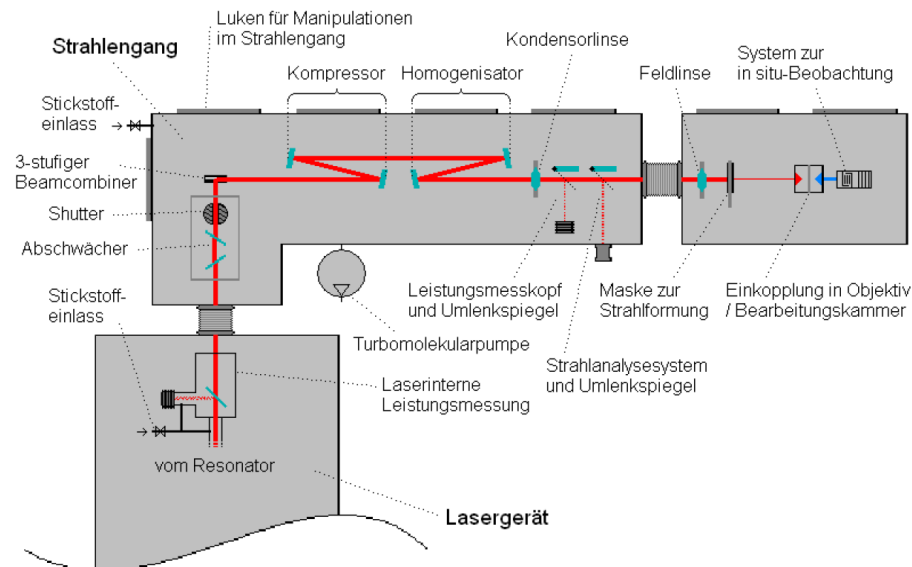
#### 2.1.1 F<sub>2</sub>-Laser

Der in die Mikrobearbeitungsanlage integrierte Laser ist der Fluorlaser LPF 220i der Firma Coherent GmbH. Im Allgemeinen ist der Fluorlaser den Excimer-Lasern zuzuordnen. Das aktive Medium ist Fluor (F<sub>2</sub>), welches durch das Zünden einer Gasentladung angeregt wird. Der Laser emittiert im vakuum-ultravioletten Bereich (VUV) bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 157 \text{ nm}$ . Dies entspricht einer Photonenenergie von  $E_{\text{Photon}} = 7,9 \text{ eV}$ . Die maximale Pulsenergie des Lasers beträgt  $E_{\text{Puls}} = 30 \text{ mJ}$  bei einer maximalen Repetitionsrate von  $f_p = 200 \text{ Hz}$ . Des Weiteren kann die Repetitionsrate in einem Bereich von 1 bis 200 Hz variiert werden. Der Laser kann nur gepulst betrieben werden, die Pulsdauer beträgt  $\tau = 25 \text{ ns}$ . Für die Bearbeitung stehen drei verschiedene Betriebsmodi zur Verfügung, der High Voltage Constant Mode (HV), der Energy Constant Mode with No Gas Replacement (EGY NGR) und der Energy Constant Mode with Partial Gas Replacement (EGY PGR) [Lam00]. Im HV-Mode wird der Laser mit konstanter Hochspannung betrieben. Über die Regelung der Spannung kann die gewünschte Pulsenergie eingestellt werden. Aufgrund der Alterung des Lasergases nimmt diese jedoch mit der Zeit ab. Im EGY NGR Mode wird dies durch die Nachregelung der Hochspannung kompensiert. Im EGY PGR Mode erfolgt die Nachregelung der Hochspannung mit teilweisem Gasaustausch, d.h. es erfolgt ein kontinuierlicher Gasaustausch im Resonator.

#### 2.1.2 Strahlführung und -formung

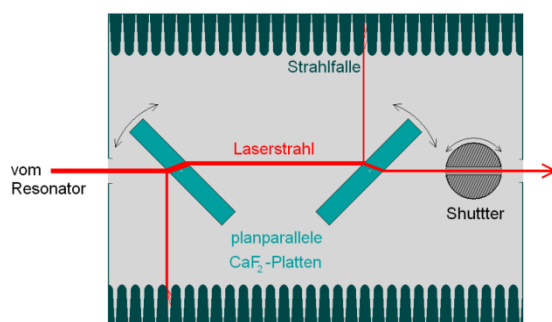
Die Bearbeitung der Substrate erfolgt über das Maskenprojektionsverfahren, was eine sehr homogene Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt voraussetzt. Dieser Anforderung wird der Rohstrahl nicht gerecht. Unmittelbar nach dem Resonator weist der Laserstrahl einen rechteckigen Querschnitt von  $23 \times 7 \text{ mm}^2$  und eine Divergenz von  $3 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad}$  auf. Zur Homogenisierung wird der Laserstrahl in mehreren Schritten aufbereitet. In Abbildung 2-1 ist der Strahlengang der Mikrostrukturierungsan-

lage schematisch dargestellt. Im Folgenden wird auf die für die Strahlformung relevanten Komponenten eingegangen.

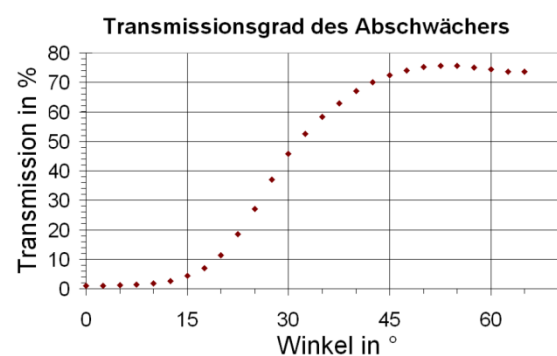


**Abbildung 2-1:** Schematische Darstellung des Strahlengangs der Mikrostrukturierungsanlage [Ber09].

Ausgehend vom Laser befindet sich als erstes optisches Element im Strahlengang ein Abschwächer, mit dem eine feine Einstellung der Laserleistung möglich ist. Der Abschwächer besteht aus zwei planparallelen Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ )-Platten, die in einem bestimmten Winkelbereich zueinander verdreht werden können. Der Transmissionsgrad von  $\text{CaF}_2$  ist abhängig vom Einfallswinkel. Somit kann die Leistung über die Änderung des Winkels eingestellt werden. Die zweite Platte dient der Kompensation des Strahlversatzes, welcher durch die erste verursacht wird (siehe Abbildung 2-2).

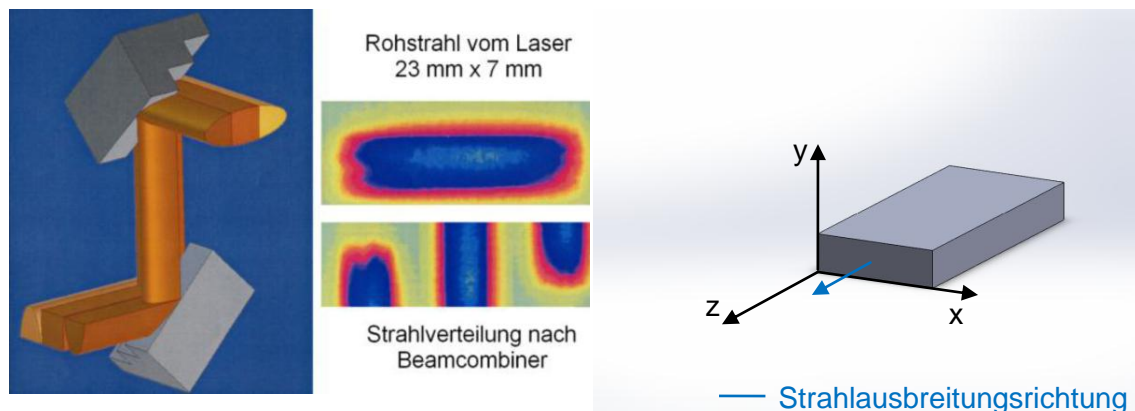


**Abbildung 2-2:** Schematischer Aufbau des Abschwächers [Ber09].



**Abbildung 2-3:** Transmissionsgrad des Abschwächers [Häh06].

Der maximale Transmissionsgrad liegt laut Hähnel [Häh06] mit 75,6 % bei 55° Abschwächer-Stellung, der minimale mit 1 % bei 0°. Bei der Winkelangabe handelt es sich um eine softwareseitige Größe, der tatsächliche Winkel der Platten zueinander ist nicht bekannt [Häh06]. Nach dem Abschwächer folgt der Beamcombiner, welcher aus zwei Treppenspiegeln besteht. Jeder der Treppenspiegel hat drei Spiegelsegmente von 15 x 15 mm<sup>2</sup>. Der Laserstrahl wird durch den ersten Treppenspiegel in drei Teilstrahlen zerlegt und vom zweiten verdreht aneinander gesetzt (siehe Abbildung 2-4).

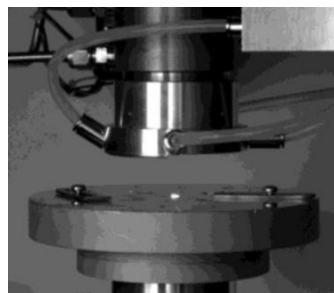


**Abbildung 2-4:** Funktionsweise des Beamcombiners (links), Laserstrahlprofil vor und nach dem Beamcombiner (rechts) [Mic05].

**Abbildung 2-5:** Definition der Strahlrichtungen.

Das Zerlegen und das anschließende verdrehte Aneinandersetzen der Teilstrahlen dient dem Angleichen der unterschiedlichen Strahldivergenzen. Der nachfolgende, aus zwei Zylinderspiegeln bestehende Kompressor verkleinert den Strahl um Faktor 3 in x-Richtung (Richtungsdefinition siehe Abbildung 2-5). Nach dem Kompressor hat der Laserstrahl einen nahezu quadratischen Querschnitt von rund 14 x 14 mm<sup>2</sup> und eine Divergenz von 1 mrad in x- und y-Richtung. Nach dem Kompressor folgt ein Homogenisierer, welcher aus zwei Mikrospiegelarrays mit je 196 Spiegelsegmenten besteht. Das erste Array dient der Aufteilung des Laserstrahls in 196 Teilstrahlen und deren Fokussierung auf den Spiegelsegmenten des zweiten Array. Das zweite Array dient der Überlagerung und Durchmischung der reflektierten Teilstrahlen. Durch den Einsatz einer Kondensor- und einer Feldlinse entsteht 0,8 m hinter dem zweiten Array ein 6 x 6 mm<sup>2</sup> großer homogen ausgeleuchteter Fleck. An dieser Position ist der Maskenhalter montiert. In den Maskenhalter können verschiedene Maskenrahmen eingespannt werden. Jeder Maskenrahmen besitzt 8 Felder in die jeweils eine Maske eingebracht werden kann. Der Maskenhalter kann senkrecht zum Laserstrahl verschoben werden und hat 8 Rastpositionen um jedes Feld der Maske im Laserstrahl positionieren zu können. Die Masken werden in Form von Blenden in den Strahlengang eingebracht

und durch das Objektiv auf dem Werkstück abgebildet. Als Maskenmaterial dient eine 50 µm dicke Tantalfolie, in die die Maskengeometrie mittels Ultrakurzpuls-Laser geschnitten wird. Die Folie wird in den oben beschriebenen Maskenrahmen eingespannt. Alternativ können Masken aus  $\text{CaF}_2$  eingesetzt werden, welche selbst mittels Fluorlaser strukturiert werden können [Pfe12]. Die homogen ausgeleuchtete Maske wird anschließend über ein Objektiv, um Faktor 26,67 verkleinert, auf dem Werkstück abgebildet. Das Auflösungsvermögen des Objektivs ist im Technikhandbuch des Herstellers [Mic05] mit rund 0,5 µm angegeben. Laut Pfeifer [Pfe15] liegt das praktikable Auflösungsvermögen bei 1 µm. Masken oder Maskenelemente zur Erzeugung von Strukturen mit kleineren Abmessungen werden unsauber abgebildet. Die durch Hähnel [Häh06] ermittelte Tiefenschärfe des Objektivs liegt bei ca. 20 µm.



**Abbildung 2-6:** Objektiv mit Schutzgasdüse [Häh06].

Unmittelbar unter dem Objektiv befindet sich eine Crossjet-Düse (siehe Abbildung 2-6), die das Objektiv während der Bearbeitung vor ablatierten Teilchen schützt. Durch eine weitere Düse wird ein stechender Gasstrom auf die Bearbeitungsstelle gerichtet, welcher der Zuführung von Prozessgas dient. Zusätzlich wird dieser mittels einer Ringdüse mit einem Gasschleier umgeben, um die Sogwirkung des stechenden Gasstroms zu verhindern. Als Arbeitsgas wird Stickstoff der Reinheit 5.0 eingesetzt.

### 2.1.3 Anlagentechnik

Aufgrund dessen, dass die vom Laser emittierte Strahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 157 \text{ nm}$  von Sauerstoff absorbiert wird, befindet sich der gesamte Strahlengang in einer Vakuumkammer. Diese kann mittels Vorpumpe (Scrollpumpe) und Turbomolekularpumpe bis zu einem Druck von  $< 5 \times 10^{-5} \text{ mbar}$  evakuiert werden. Im Anschluss erfolgt die Füllung der Kammer mit Stickstoff der Reinheit 5.0, um die mittlere freie Weglänge eventuell ablatierter Teilchen im Strahlengang zu verkürzen und somit die Beschädigung optischer Komponenten zu verhindern. Das Objektiv kann separat über

den Strahlengang evakuiert werden. Des Weiteren kann die Bearbeitungskammer mit der Vorpumpe bis in den Bereich des Vorvakuums evakuiert werden. Innerhalb der Bearbeitungskammer befindet sich ein Achssystem, mit dessen Hilfe die Werkstücke unter dem Objektiv positioniert werden können. Dies setzt sich aus drei Linearachsen (x-, y- und z-Achse) und einer Drehachse ( $\varphi$ -Achse) zusammen. Die x- und y-Achse werden durch Linearmotoren, die z-Achse durch einen Servomotor angetrieben. Die entsprechenden Parameter der Achsen sind in Tabelle 2-1 aufgelistet.

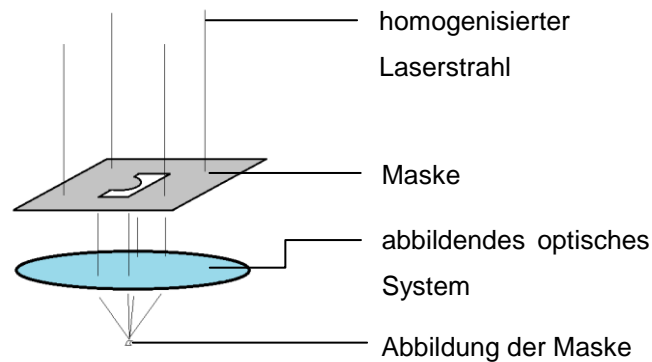
**Tabelle 2-1:** Parameter des Achssystems [Mic05].

	<b>y-Achse ALS20020</b>	<b>x-Achse ALS10020</b>	<b>z-Achse AVS125</b>	<b><math>\varphi</math>-Achse DT80</b>
<b>Verfahrweg</b>	200 mm	200 mm	25 mm	360° (endlos)
<b>Max. Geschwindigkeit o. Last</b>	750 mm/s	750 mm/s	50 mm/s	30 °/s
<b>Auflösung</b>	50 nm	50 nm	106 nm	0,001°
<b>Wiederholgenauigkeit</b>	+/- 0,5 $\mu$ m	+/- 1 $\mu$ m	+/- 0,75 $\mu$ m	0,01°
<b>Ebenheit</b>	+/- 4 $\mu$ m	+/- 4,8 $\mu$ m	+/- 5 $\mu$ m	+/- 50 $\mu$ m
<b>Gewicht</b>	17,5 kg	11 kg	10,5 kg	0,8 kg
<b>Max. Last horizontal</b>	70 kg	50 kg	10,5 kg	2 kg

## 2.2 Lasermikrostrukturierung

### 2.2.1 Maskenprojektionsverfahren

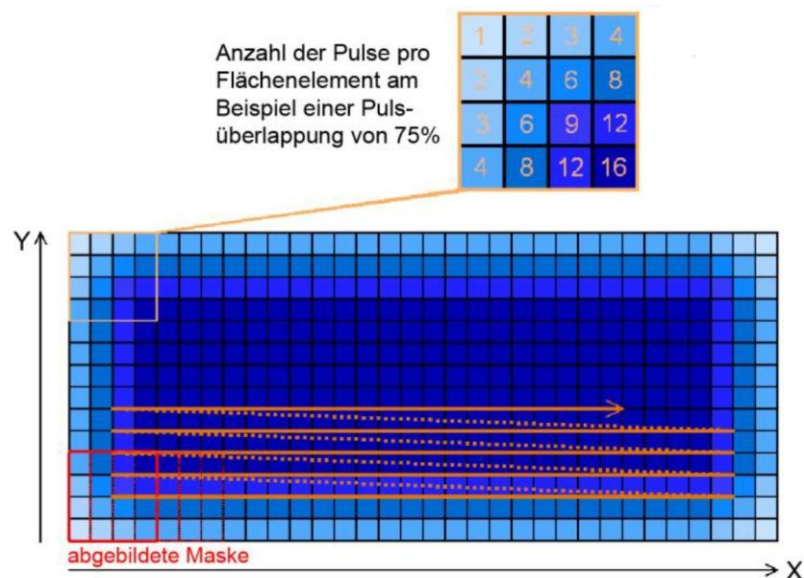
Die Mikrostrukturierung mittels Laserstrahlung kann allgemein in abbildende und schreibende Verfahren eingeteilt werden [Pop05]. Aufgrund der Strahleigenschaften wird für die Strukturierung mittels Excimerlaser das Maskenprojektionsverfahren eingesetzt [Hüg92]. Die eingesetzten Masken sind Transmissionsmasken in Form von Blenden, die von einem homogenisierten Laserstrahl vollständig ausgeleuchtet und mittels eines Objektivs verkleinert auf dem Werkstück abgebildet werden (siehe Abbildung 2-7). Im Bereich der Abbildung kommt es beim Überschreiten der Schwellfluenz zur Ablation von Material und dadurch zur Übertagung der Maskengeometrie auf das Werkstück. Die Tiefe der erzeugbaren Struktur hängt maßgeblich vom Abtrag pro Puls und der Anzahl der Pulse ab [Häh06]. Die laterale Ausdehnung der Strukturen ist im Allgemeinen durch die Größe des homogenen Flecks und den Abbildungsmaßstab begrenzt.



**Abbildung 2-7:** Prinzip des Maskenprojektionsverfahrens.

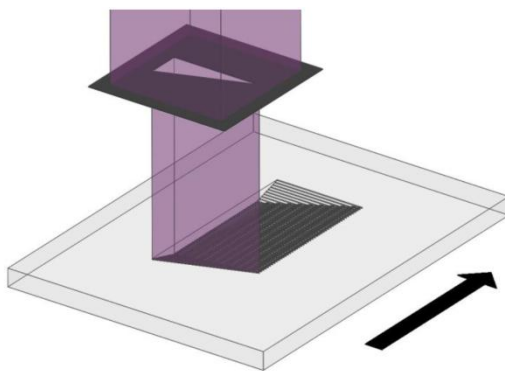
### 2.2.2 Erzeugung eines Flächenabtrags

Durch das Aneinandersetzen mehrerer Einzelabträge kann ein großflächiger Abtrag realisiert werden. Die Anzahl der Pulse pro Flächenelement kann durch den Überlappungsgrad (ÜLP) aufeinander folgender Einzelabträge gesteuert werden, sodass eine flächige Strukturierung mit definierter Tiefe möglich ist (Vgl. Abbildung 2-8, mittlerer Bereich). Durch das überlappende Aneinandersetzen entsteht, aufgrund der geringer werdenden Zahl der Einzellabträge zum Rand hin, ein stufenförmiger Abtrag [Häh06]. Die Flächenelemente am Rand der Struktur erfahren bei 75 % ÜLP maximal 4 Einzellabträge, in der Mitte der Struktur sind es 16 (Vgl. Abbildung 2-8).

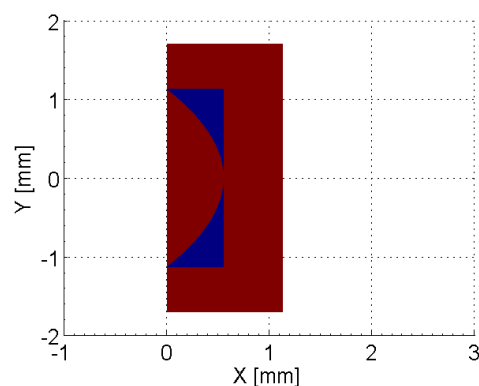


**Abbildung 2-8:** Prinzipielle Erzeugung eines flächigen Abtrags mit quadratischer Maske nach [Ber09].

Je größer der ÜLP bzw. je kleiner die Puls-zu-Puls-Distanz (PPD) ist, desto steiler werden die entstehenden treppenförmigen Strukturflanken. Der ÜLP bestimmt sich laut Bertram [Ber09] aus der Fläche des Überlappungsbereichs zur Gesamtfläche der Abbildung. Dieser kann durch die PPD, bei fester PPD aber auch durch die Maskenausdehnung selbst, gesteuert werden. Durch eine sich quer zur Vorschubrichtung ändernde Maskenausdehnung in Vorschubrichtung ist die Erzeugung von 3D-Strukturen bei einer festen PPD möglich. Diesem Prinzip folgend, können Blaze-Gitter mit Dreiecksmasken (Abbildung 2-9) oder Zylinderlinsen mit Freiformmasken (Abbildung 2-10) hergestellt werden [Pfe12, Püs14, Büt15a].



**Abbildung 2-9:** Prinzip der Herstellung schräger Flächen durch den Einsatz von Dreiecksmasken [Pfe12].

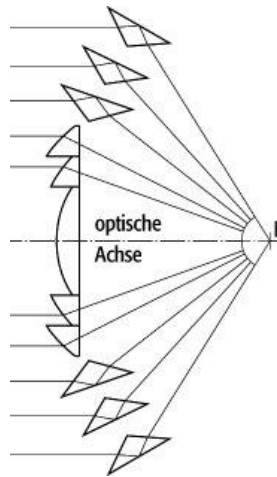


**Abbildung 2-10:** Freiformmaske zur Herstellung einer sphärischen Zylinderlinse.

## 2.3 Fresnel-Linse

### 2.3.1 Funktion

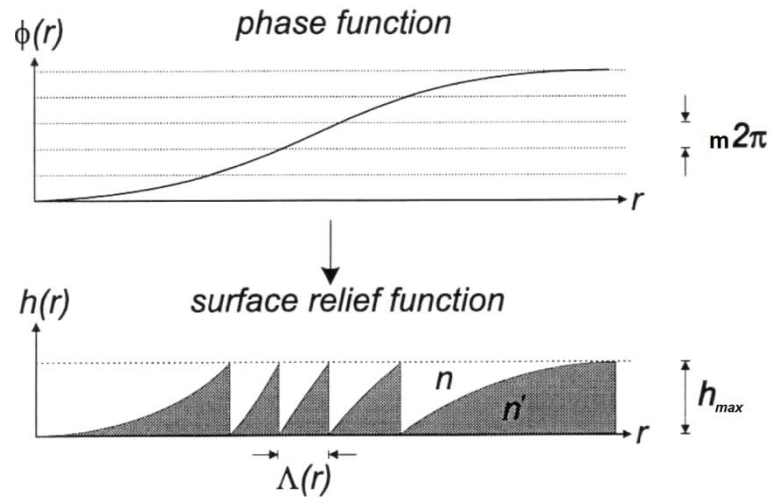
Die Fresnel-Linse bezeichnet die von A.J. Fresnel entwickelte Form einer Sammellinse. Diese Linsenform dient dem Zweck, die Dicke und somit das Gewicht von Linsen mit großer Apertur zu reduzieren. Im Allgemeinen besteht die Linse aus einer dünnen sphärischen oder asphärischen Mittellinse, welche von stufenförmigen Ringzonen umgeben ist [Spe15]. Als Erstes ersetzten diese die bis dahin verbauten Hohlspiegel in Leuchttürmen und Scheinwerfern [Gro15]. Heutzutage finden Fresnel-Linsen beispielsweise in Projektoren oder als flache Lupen Anwendung [Roh15]. Die Funktion der Linsen beruht, wie bei einer herkömmlichen Linse, auf der Brechung des Lichtes an den Grenzflächen [Ric15]. Dies gilt jedoch nur für makroskopische Linsen.



**Abbildung 2-11:** Strahlengang einer Fresnel-Linse, F: Brennpunkt [Spe15].

Auch im Bereich der Mikrooptik werden zunehmend Fresnel-Linsen eingesetzt, wie z.B. in chromatischen Abstandssensoren [Fri06]. Der Vorteil der Strukturen ist die flache Bauweise und die geringe Dispersion [Gar08]. Die Verkleinerung der Strukturen hat zur Folge, dass neben der Brechung des Lichtes die Beugung einen wesentlichen Einfluss auf die Funktion der optischen Elemente hat. Fresnel-Linsen, deren Zonen Abmessungen im Bereich weniger Mikrometer haben, müssen den diffraktiven optischen Elementen (DOE) zugeordnet werden [Ste15]. In der Literatur werden Fresnel-Linsen und Fresnel-Zonenplatten nicht immer eindeutig voneinander unterschieden. Die Fresnel-Zonenplatte stellt laut O'Shea et al. [OSh04] die Basis aller diffraktiven Linsen dar, deren Ausführung in Form eines binären, mehrstufigen oder kontinuierlichen Oberflächenprofils unterschieden werden kann. Letzteres wird auch als Kinoform bezeichnet. Bei der wellenoptischen Betrachtung der Funktion einer dünnen Linse kann diese als Wellenfrontenwandler verstanden werden. Die Wellenfront einer ebenen Welle wird aufgrund der unterschiedlichen optischen Wege innerhalb der Linse und der damit einhergehenden ortsabhängigen Phasenverzögerung zu einer kugelförmigen Wellenfront. Diese läuft im Fokus der Linse zusammen. Bei einer Kinoform wird dies durch die Modulation der Phase der ebenen Welle in Abhängigkeit vom Radius  $r$  zur optischen Achse über eine Phasenfunktion  $\Phi(r)$  realisiert. Dabei wird die Phase zwischen  $0$  und  $m \cdot 2\pi$  moduliert,  $m$  wird in diesem Zusammenhang als Beugungsordnung bezeichnet. Die Modulation einer gegebenen Phasenfunktion mit  $m \cdot 2\pi$  führt zur Unterteilung der Oberfläche in einzelne Zonen. In Abbildung 2-12 ist eine Phasenfunktion und die durch die Modulation unterteilte Oberfläche eines optischen Elementes dargestellt. Innerhalb jeder Zone entspricht der Verlauf des Höhenprofils  $h(r)$  dem Phasenverlauf  $\Phi(r)$ .





**Abbildung 2-12:** Phasen- und Oberflächenfunktion nach [Tur97].

Aus der Phasenfunktion kann mittels Gleichung (2-1) der Verlauf des Profils, unter Berücksichtigung der Brechzahlen des Linsenmaterials  $n$  und des Ausbreitungsmediums  $n'$ , berechnet werden.

$$h(r) = \frac{\lambda}{2\pi(n - n')} \cdot \phi(r) \quad (2-1)$$

Durch die Modulation der Phasenfunktion ergibt sich, unter Berücksichtigung der Wellenlänge  $\lambda$ , der Beugungsordnung  $m$  und den Brechzahlen  $n$  und  $n'$ , eine maximale Höhe  $h_{max}$  des Profils mit der Gleichung:

$$h_{max} = \frac{m \cdot \lambda}{(n - n')} \quad (2-2)$$

Des Weiteren kann bei Kenntnis der Phasenfunktion die lokale Gitterperiode  $\Lambda(r)$  aus der Gleichung

$$\Lambda(r) = \frac{m \cdot 2\pi}{\partial \phi(r) / \partial r} \quad (2-3)$$

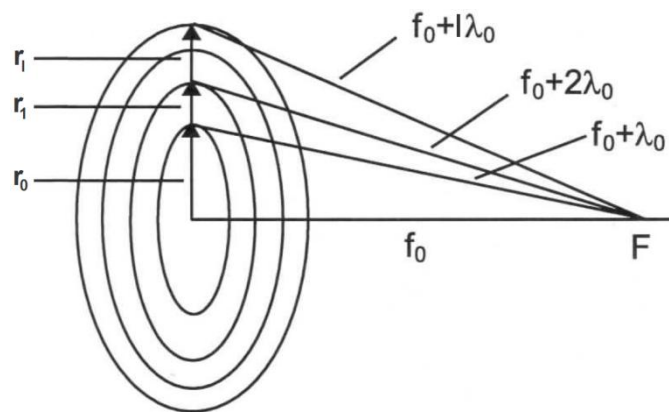
berechnet werden. Die lokale Gitterperiode hat einen wesentlichen Einfluss auf die Funktion der optischen Elemente und muss bei der Berechnung der Linsengeometrie aufgrund der dadurch entstehenden Beugungseffekte berücksichtigt werden. Die ringförmigen Zonen können diesbezüglich als zirkulares Beugungsgitter, vergleichbar mit einer Fresnel-Zonenplatte, aufgefasst werden. Die Radien  $r_l$  der Fresnel-Zonen ergeben sich aus der Bedingung, dass sich sämtliche Elementarwellen im Fokus konstruktiv überlagern (siehe Abbildung 2-13).

$$r_l = \sqrt{2fl\lambda_0 + l^2\lambda_0^2} \quad (2-4)$$

Der Term  $l^2 \cdot \lambda_0^2$  ist im Allgemeinen sehr klein und kann vernachlässigt werden. Somit kann der Ausdruck für die Zonenradien zu

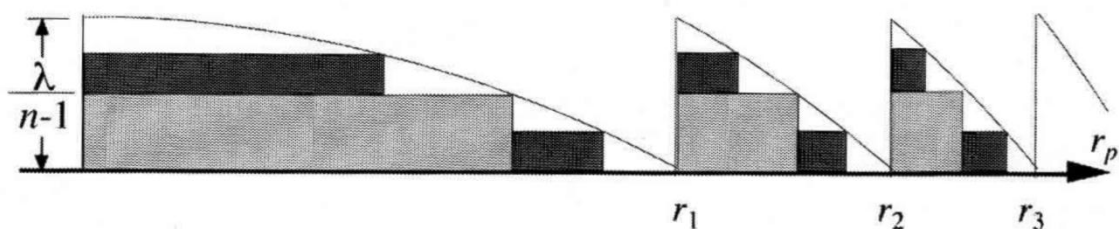
$$r_l = \sqrt{2fl\lambda_0} \quad (2-5)$$

vereinfacht werden. Es ist zu berücksichtigen, dass dies für die 1. Beugungsordnung gilt. Mit jeder höheren Ordnung ergibt sich ein weiterer Punkt auf der optischen Achse, an dem die Interferenzbedingung erfüllt ist.



**Abbildung 2-13:** Konstruktion der Radien der Fresnel-Zonen [Tur97].

Die Intensitätsverteilung im Fokus des Beugungsgitters hängt auch maßgeblich von der Profilform innerhalb der Zonen ab. Im Idealfall ist diese so optimiert, dass die Brennweite des diffraktiven Gitters und die Brennweite des Profils, verursacht durch dessen refraktive Wirkung, aufeinander fallen [Tur97]. Aufgrund der komplizierten Herstellung kontinuierlicher Oberflächenprofile können diese durch stufenförmige Profile angenähert werden (siehe Abbildung 2-14).



**Abbildung 2-14:** Vierstufige Näherung einer Kinoform.

Dabei steigt die Beugungseffizienz mit zunehmender Anzahl der Höhenstufen. Die größte Beugungseffizienz ergibt sich für das kontinuierliche Oberflächenprofil der Kinoform (Tabelle 2-2).

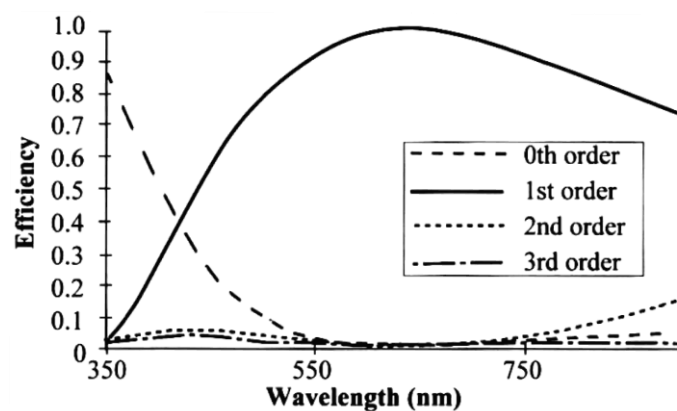
**Tabelle 2-2:** Beugungseffizienz diffraktiver optischer Elemente in Abhängigkeit von der Anzahl der Höhenstufen [OSh04].

Levels	Efficiency (%)
2	40
4	81
8	95
16	99
Linear	99
Polynomial	100

Diffraktive Linsen sind so ausgelegt, dass sie nur bei der Design-Wellenlänge korrekt funktionieren. Andernfalls ändert sich die Brennweite und die Beugungseffizienz sinkt (siehe Abbildung 2-15). Die Beugungseffizienz  $\eta$  diffraktiver Linsen (Kinoform) ergibt sich nach

$$\eta = \frac{\sin^2[\pi(\alpha - m)]}{[\pi(\alpha - m)]^2} \quad (2-6)$$

und hängt von dem Parameter  $\alpha$  sowie der betrachteten Beugungsordnung  $m$  ab. In der Regel wird aufgrund der hohen Effizienz die 1.Ordnung ( $m=1$ ) betrachtet [OSh04].



**Abbildung 2-15:** Effizienz einer für  $\lambda = 633$  nm ausgelegten diffraktiven Linse in Abhängigkeit von der Wellenlänge [OSh04].

Der Parameter  $\alpha$  beschreibt das Verhältnis von der verwendeten Wellenlänge zur Design-Wellenlänge unter Berücksichtigung der Dispersion des Materials. Der Parameter wird auch als „detuning parameter“ bezeichnet und kann mit der Gleichung

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \quad (2-7)$$

berechnet werden [OSh04]. Die angegebene Gleichung gilt näherungsweise für die Ausbreitung in Luft  $n' \approx 1$ . Nur bei der Design-Wellenlänge wird die gesamte Strahlung in die 1.Ordnung gebeugt. Dennoch ist die Effizienz in einem großen Bereich um die Design-Wellenlänge sehr hoch (Vgl. Abbildung 2-15). Bei der Auslegung solcher optischen Elemente ist es jedoch nicht immer sinnvoll die 1.Beugungsordnung zu verwenden, da die Zonen unter Umständen sehr klein werden. Eine Linse mit entsprechend großer Apertur würde dementsprechend aus vielen kleine Zonen bestehen. Daraus ergeben sich zwei Probleme. Einerseits ist die minimal herstellbare Zonengröße durch das Auflösungsvermögen der Fertigungsverfahren begrenzt, d.h. die Zonen können nicht beliebig klein gefertigt werden. Andererseits werden die Zonenübergänge als problematisch angesehen, da deren Qualität meist nicht den Anforderungen entspricht. Durch abgerundete Ecken und Kanten an den Zonengrenzen verkleinert sich das optisch aktive Gebiet der Linse. An jedem Zonenübergang wird ein Teil der Strahlung gestreut, was zur Verringerung der Beugungseffizienz führt. Der Anteil der Streustrahlung nimmt mit zunehmender Zahl an Zonengrenzen zu. Um dem entgegenzuwirken, wird die Beugungsordnung so groß wie möglich gewählt, was gleichzeitig zu einer Vergrößerung der Zonen in lateraler und vertikaler Richtung führt [Tur97].

Wie bereits erwähnt, bestimmt der Verlauf der Oberfläche die Intensitätsverteilung innerhalb der Beugungsordnung und somit auch die Effizienz der Linse. Laut Turunen et al. [Tur97] ergibt sich die größte Effizienz für die optimale Höhe  $h_{opt}$  der Struktur nach der Gleichung:

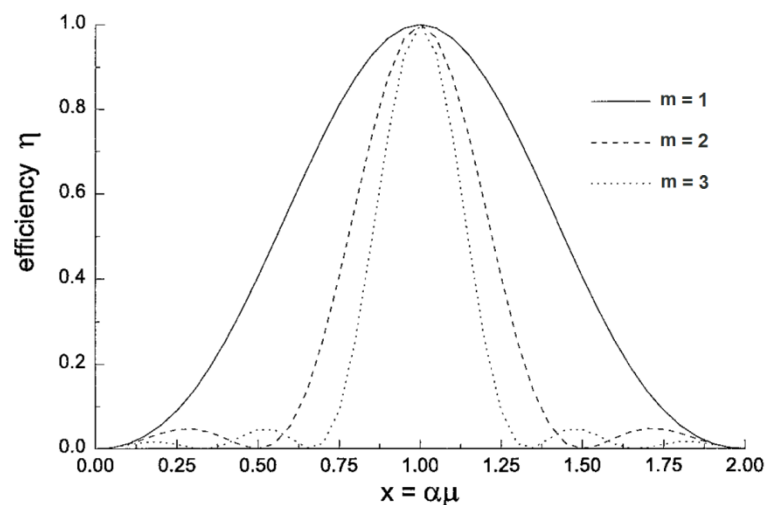
$$h_{opt} = \frac{m \cdot \lambda_0}{n - n' \sqrt{1 - [m \cdot \lambda_0 / \Lambda(r)]^2}} \quad (2-8)$$

Die optimale Höhe ist abhängig von der Beugungsordnung  $m$ , der Design-Wellenlänge  $\lambda_0$ , den Brechzahlen  $n$  und  $n'$  sowie von der lokalen Gitterperiode  $\Lambda(r)$ . Mit größer werdender Beugungsordnung weichen die Maximalhöhe  $h_{max}$  und die optimale Höhe  $h_{opt}$  zunehmend voneinander ab. Im Allgemeinen führen Abweichungen des Profils  $h(r)$  zur Verringerung der Effizienz.

Diese können laut Turunen et al. [Tur97] als lineare Abweichungen mittels Gleichung

$$h'(r) = \mu \cdot h(r) \quad (2-9)$$

beschrieben werden. Das abweichende Profil  $h'(r)$  ergibt sich aus dem Profil  $h(r)$  und dem Abweichungsfaktor  $\mu$ . Die Abweichungen vom idealen Profil haben besonders für Linsen, die in höheren Beugungsordnungen arbeiten, einen starken Einfluss auf deren Effizienz. Dies kann aus Abbildung 2-16 entnommen werden. In der Abbildung ist die Effizienz in Abhängigkeit vom Produkt  $\alpha \cdot \mu$  dargestellt.



**Abbildung 2-16:** Abhängigkeit der Effizienz vom detuning parameter  $\alpha$  und der linearen Abweichung  $\mu$  für die 1., 2. und 3. Beugungsordnung nach Turunen [Tur97].

Es ist zu erkennen, dass der Bereich hoher Effizienz mit zunehmender Beugungsordnung schmaler wird, d.h. mit zunehmender Beugungsordnung werden Fertigungstoleranzen immer geringer.

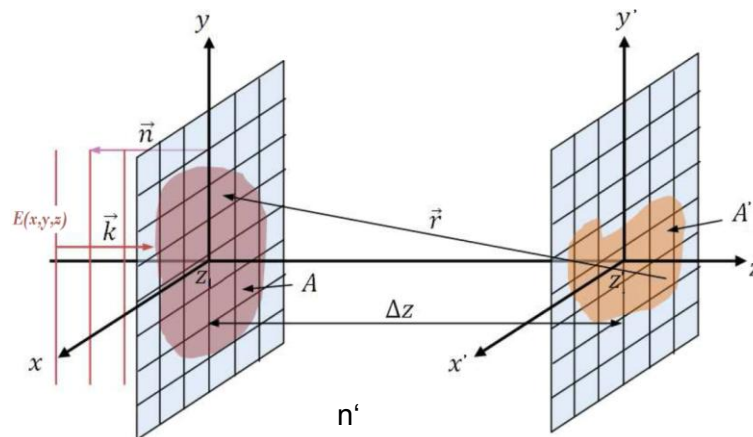
Wie zu Beginn des Kapitels erwähnt, gibt es für diese Art Linsen in der Literatur mehrere Bezeichnungen. In dieser Arbeit wird nur die Bezeichnung Fresnel-Linse benutzt, da somit eine eindeutige und kurze Bezeichnung der Linsenelemente möglich ist. Im Folgenden werden die Bereiche einer Fresnel-Linse als Mittellinse bzw. Fresnel-Zonen bezeichnet. Die Mittellinse erstreckt sich bis zur 1. Zonengrenze, die darauf folgende 1. Fresnel-Zone erstreckt sich von der 1. bis zur 2. Zonengrenze. Für die darauf folgenden Zonen wird die Nummerierung weitergeführt.

### 2.3.1 Das Fresnel-Kirchhoffsche Beugungsintegral

Die Ausbreitung von Strahlung in Form elektromagnetischer Wellen kann über das Huygens-Fresnel'sche Prinzip beschrieben werden. Gemäß diesem geht von jedem Punkt einer Wellenfront eine halbkugelförmige Elementarwelle aus. Durch die Überlagerung dieser Elementarwellen entsteht eine, in Ausbreitungsrichtung vorangeschrittene, Wellenfront [Ped05]. Durch das fundamentale Prinzip der Überlagerung von Elementarwellen ist neben der Beschreibung von Beugungserscheinungen auch die Berechnung der Lichtausbreitung im Raum sowie beim Durchlaufen von Grenzflächen möglich [Neu14]. Mathematisch kann diese Wellenausbreitung mit dem Fresnel-Kirchhoffschen-Beugungsintegral beschrieben werden.

$$E(x', y', z') = \frac{n'}{i\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, z) \frac{e^{i\Phi(x,y)}}{r} N_0(x, y, z) dx dy \quad (2-10)$$

Die auf einer Zielfläche  $A'$  resultierende elektrische Feldstärke  $E(x', y', z')$  ergibt sich aus der Summation der Feldstärke aller, von der Startfläche  $A$  ausgehenden, Elementarwellen  $E(x, y, z)$ . Dabei stellt  $n' / i\lambda$  einen Phasen- und Amplitudenfaktor und  $N_0(x, y, z)$  einen Richtungsfaktor dar. Die Elementarwellen breiten sich in einem Medium mit der Brechzahl  $n'$  aus. Für  $|x|, |y| \ll z$  bzw.  $|x'|, |y'| \ll z$  kann der Richtungsfaktor gleich 1 gesetzt werden. Die Summation erfolgt unter Berücksichtigung der Phase  $e^{i\Phi(x,y)}$  bzw. des Abstandes  $\Delta z$  von Abstrahl- und Abbildungsfläche.



**Abbildung 2-17:** Schematische Darstellung von Abstrahl- und Abbildungsfläche, nach [Olb12].

Mit zunehmendem Abstand  $r$  fällt die Feldstärke der kugelförmigen Elementarwelle mit  $1/r$  ab. Dieser kann über den Satz des Pythagoras mit der Gleichung

$$r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + \Delta z^2} \quad (2-11)$$

berechnet werden [Olb10, Olb12, Dem06]. Die Phase der Kugelwellen wird bei Linsen maßgeblich durch die optische Dicke der Linse bestimmt und ist von der geometrischen Dicke und der Brechzahl  $n$  des Materials für die Wellenlänge  $\lambda$  abhängig. Liegt die Linsendicke als Oberflächenprofil vor, kann die durch die Linse verursachte Phasenverzögerung für jede Elementarwelle mit

$$\Phi(x, y) = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) (n - 1) \cdot h(x, y) \quad (2-12)$$

berechnet werden. Die Änderung der Phase resultiert nur aus den Unterschieden der optischen Dicke des Profils [OSh04]. Auf Grundlage des Huygens-Fresnel'schen Prinzips kann somit die optische Antwort sowohl der simulierten als auch der strukturierten Fresnel-Linsen berechnet werden. Aus der berechneten Feldstärke-Verteilung kann die qualitative Intensitätsverteilung ermittelt werden, da gilt:

$$I \sim |E^2| = E \cdot E^* \quad (2-13)$$

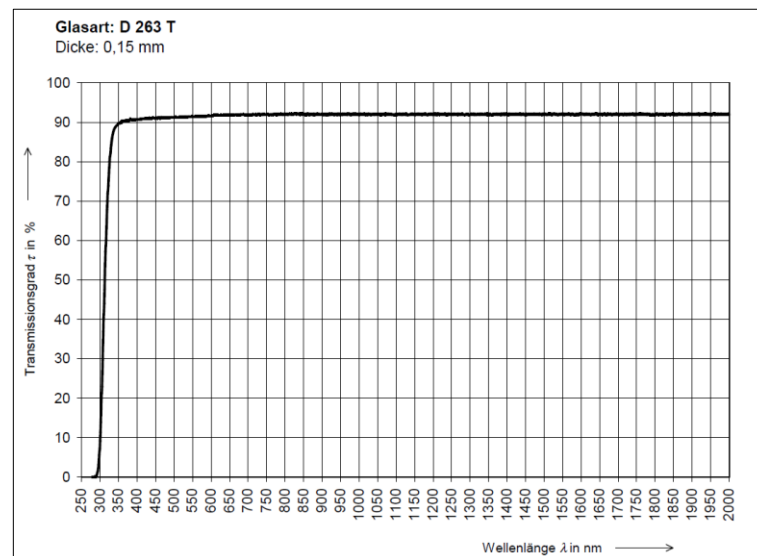
Die Feldstärke  $E$  ist im Allgemeinen eine komplexe Größe, welche zur Bildung des Betragsquadrates mit der komplexkonjugierten Feldstärke  $E^*$  multipliziert werden muss [Ped05].

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Material

##### 3.1.1 D263T (Borosilikatglas)

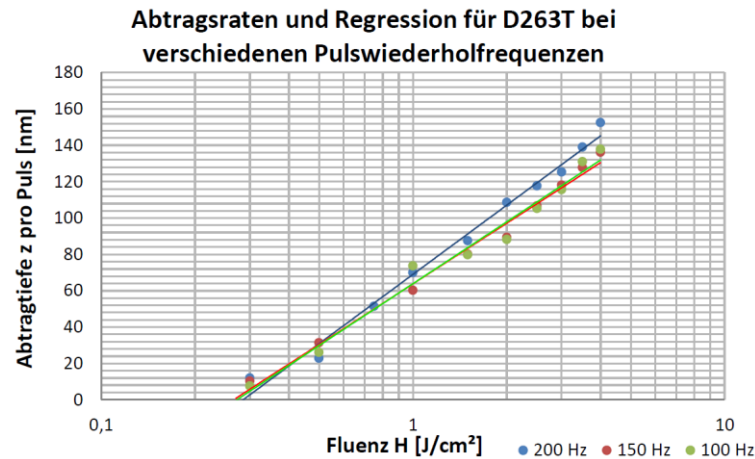
Der Werkstoff D263T ist ein amorphes Borosilikatglas der Firma Schott AG, welches aufgrund seiner Zusammensetzung eine gute chemische Beständigkeit aufweist. Eingesetzt wird dieses Glas z.B. für Touche-Control-Panel (TCP), liquid crystal displays (LCDs), Solarzellen oder mikrooptische Bauelemente mit hoher Zerstörschwelle. Die gute chemische Beständigkeit, die hohe Transparenz und Laserbeständigkeit macht diesen Werkstoff universell einsetzbar [Sch05, IOF14]. Die Dicke der verwendeten Substrate beträgt  $d_{\text{sub}} = 0,5 \text{ mm}$ , deren Fläche  $A_{\text{sub}} = 30 \times 20 \text{ mm}^2$ . In Abbildung 3-1 ist der spektrale Transmissionsgrad dargestellt.



**Abbildung 3-1:** Spektraler Transmissionsgrad D263T [Sch05].

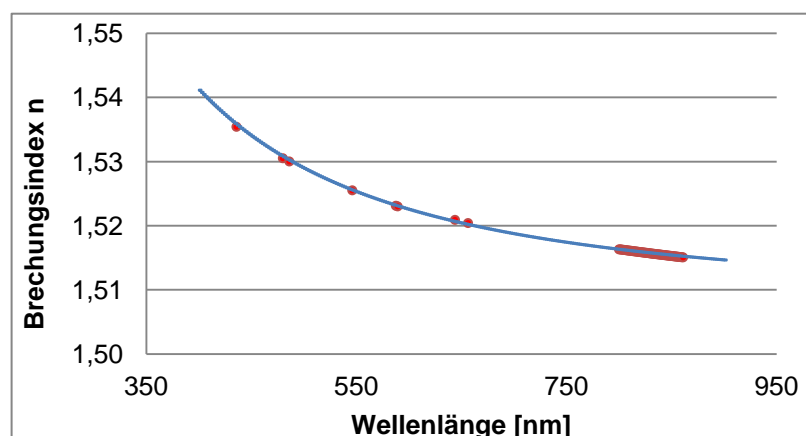
Aus Abbildung 3-1 geht hervor, dass der Werkstoff für Strahlung mit einer Wellenlänge von  $\lambda < 300 \text{ nm}$  nicht mehr transparent ist. In der Arbeit von Püschel [Püs14] wurde das Abtragsverhalten bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 157 \text{ nm}$  untersucht. Im Zuge dessen wurden die Schwellfluenz  $H_s$  und der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  ermittelt. In Abbildung 3-2 ist der Abtrag pro Puls für verschiedene Fluenzen und Pulsfrequenzen dargestellt. Für die Schwellfluenz wird von Püschel [Püs14] ein Wert von  $H_s = 0,27 \text{ J/cm}^2$  und für den Absorptionskoeffizient ein Wert von  $\alpha = 20,1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  angegeben.





**Abbildung 3-2:** Abtrag pro Puls in Abhängigkeit von der Fluenz und der Pulswiederholfräquenz [Püs14].

Auf der Grundlage dieser Werte erfolgt die Berechnung des Abtrags pro Puls für die Simulation und Strukturierungsversuche. Zur Untersuchung der optischen Eigenschaften und der Berechnung der Brennweiten der hergestellten Linsen ist die Kenntnis der Brechzahl für die entsprechende Wellenlänge notwendig. Im Datenblatt des Materials sind nur Brechzahlen für ausgewählte Wellenlängen angegeben. Da es sich bei dem Werkstoff um ein technisches und kein optisches Glas handelt, werden im zugehörigen Datenblatt keine Sellmeier-Koeffizienten angegeben. Mit Hilfe der vom Hersteller Schott AG übermittelten Brechzahlen konnte der Brechzahlverlauf ermittelt werden. Dies erfolgte über die empirische Näherung von Cauchy zur Beschreibung normaler Dispersion [Sch15, Ped05].



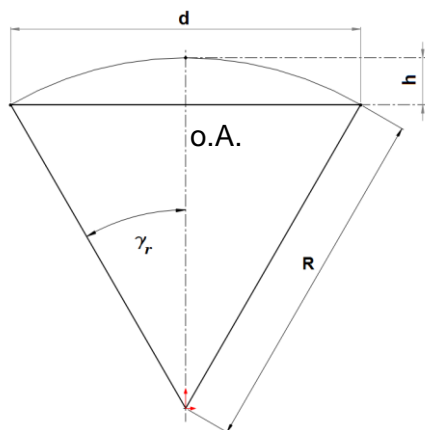
**Abbildung 3-3:** Gegebene Brechzahlen und Brechzahlverlauf für die ermittelten Cauchy-Koeffizienten ( $A = 1,5085$ ,  $B = 4,879 \cdot 10^{-5} \mu m^2$ ,  $C = 5,296 \cdot 10^{-5} \mu m^4$ ) (siehe Anhang A1).

## 3.2 Methoden

Wie in Kapitel 2.2.2 bereits beschrieben, hängt die Tiefe der Strukturen bei festem ÜLP maßgeblich von der Maskenausdehnung ab. Ausgehend von der Annahme, dass die Maskenausdehnung in Vorschubrichtung proportional zur Tiefe der Struktur sein muss, kann die Berechnung der Masken mit zwei verschiedenen Methoden erfolgen. Die Berechnungen wurden mit der Software Matlab® der Firma The MathWorks Inc. durchgeführt. Im Zuge der Untersuchungen wurde nach einer möglichst einfachen Methode zur Beschreibung der Maskengeometrie gesucht, welche leicht verständlich und einfach erweiterbar ist. Die Berechnungsmethode 1 wurde mit dem Ziel entwickelt, eine möglichst universelle Maske zu generieren, mit der Fresnel-Linsen mit unterschiedlichen Krümmungsradien erzeugt werden können. Die Berechnungsmethode 2 dient der sehr einfachen Maskenberechnung anhand einer definierten Linsengeometrie. Im Folgenden werden beide Methoden vorgestellt.

### 3.2.1 Berechnungsmethode 1

Für die Maskenberechnung mittels der Berechnungsmethode 1 erfolgt in einem ersten Schritt die Berechnung des halben Öffnungswinkels  $\gamma_r$  aus der Apertur  $d = 2 \cdot r$  und dem Krümmungsradius  $R$ . Die Linse kann diesbezüglich als Teil eines Kreissektors beschrieben werden, dessen halber Öffnungswinkel dem Winkel zwischen der optischen Achse (o.A.) der Linse und dem Radius  $R$  an der Stelle der halben Apertur entspricht (siehe Abbildung 3-4).



**Abbildung 3-4:** Linsenparameter und Winkel für die Maskenberechnung.

Die Berechnung des Winkels  $\gamma_r$  erfolgt über die Gleichung

$$\gamma_r = \arcsin\left(\frac{d}{2 \cdot R}\right) \quad (3-1)$$

Mit Hilfe des berechneten Winkels kann die Beschreibung der Höhe  $h$  in Abhängigkeit vom laufenden Winkel  $\gamma$  mittels der Gleichung

$$h(\gamma) = R \cdot (\cos(\gamma) - 1) \quad (3-2)$$

$$\gamma = 0 - \gamma_r$$

erfolgen. Der Koordinatenursprung liegt im Scheitelpunkt der Linse. Die Maskenausdehnung muss in Vorschubrichtung zur Tiefe der Struktur und somit zum  $\cos$ -Term von Gleichung (3-2) proportional sein. Zur Berechnung wird nur dieser Term verwendet, da möglichst nur die Proportionalität genutzt werden soll. Die Berechnung der Maskengeometrie erfolgt mit einem eigens dafür entwickelten Programm, welches die Geometrie in Form einer Matrix der Größe  $p \times q$  speichert. Dabei wird dem Maskenbereich ein negativer Abtragswert zugewiesen. Die Zuweisung erfolgt unter Einbeziehung des  $\cos$ -Terms aus Gleichung (3-2) durch die Iteration über die Matrixelemente  $(i,j)$  durch die Bedingung

$$i \cdot \Delta e \leq \frac{b}{N_r} \cdot \left( \cos\left(\frac{j \cdot \gamma_r}{N_r}\right) - \cos(\gamma_r) \right) \quad (3-3)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, p \quad j = 1, 2, 3, \dots, q$$

Die Variablen  $i$  und  $j$  sind die Indices der Matrixelemente über die die Iteration in Form zweier for-Schleifen erfolgt. Die Faktoren  $b$  und  $N_r$  dienen der Skalierung des Wertebereiches des  $\cos$ -Terms, auf deren Berechnung wird im Folgenden eingegangen. Der  $\cos$ -Term wurde so abgeändert, dass die Funktion in dem Winkelbereich von  $\gamma = 0 - \gamma_r$  positive Werte liefert. Aufgrund der Symmetrie der Zylinderlinsen erfolgt die Maskenberechnung nur für eine Seite. Die Maskenmatrix wird anschließend um die Symmetrieachse gespiegelt. Demnach sind nur die Werte zwischen 0 und der halben Apertur, also dem Abstand  $r$ , von Interesse. Die Iteration beschränkt sich somit in  $y$ -Richtung auf den Bereich  $j = 0$  bis  $N_r$ , welcher den Radius  $r$  in Form einer äquivalenten Anzahl an Elementen widerspiegelt. Der Begriff des Radius oder Zonenradius ist nur für rotationssymmetrische Linsen sinnvoll. Für die Zylinderlinsen stellt die Variable den Abstand vom Mittelpunkt zum Rand der Linse bzw. der Zone dar und wird im Folgenden auch als Abstand bezeichnet.

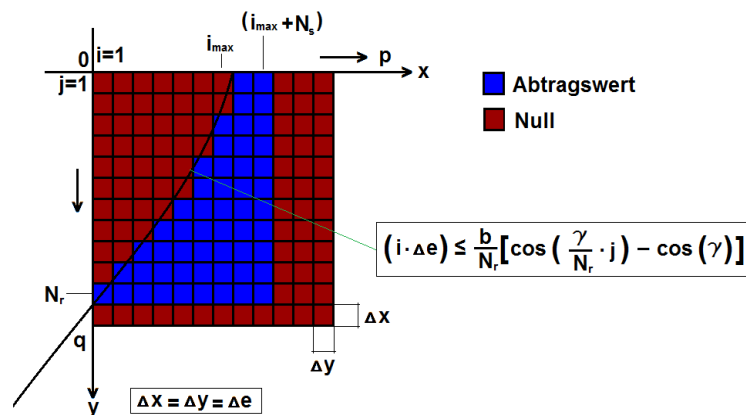
Die Anzahl der Elemente berechnet sich somit aus dem Abstand zum Linsenrand und der Elementgröße  $\Delta e$  mittels der Gleichung:

$$N_r = \frac{r}{\Delta e} \quad (3-4)$$

Die Größe der Elemente wurde mit  $\Delta x = \Delta y = \Delta e = 50$  nm festgelegt. Die Bedingung werden in der Form  $x = f(y)$  bzw.  $i = f(j)$  formuliert, was einer Drehung des Koordinatensystems um  $-90^\circ$  entspricht (siehe Abbildung 3-5). Um ein korrektes Verhältnis der Variable zum Funktionswert zu erhalten, müssen die Wertebereiche in x- bzw. i- und in y- bzw. j-Richtung entsprechend skaliert werden. Für den Wertebereich der Funktion erfolgt dies durch das Teilen des berechneten Winkels durch die Anzahl  $N_r$ . Des Weiteren wird für die Skalierung der gesamte Wertebereich des cos-Terms durch die Anzahl der  $N_r$  geteilt und der Proportionalitätsfaktor  $b$  eingeführt, um die Maskenausdehnung der zu erzeugenden Höhe  $h$  anzupassen. Der Faktor  $b$  berechnet sich aus der Höhe  $h$  und der maximalen Anzahl der Pulse  $N$  pro Flächenelement mit der Gleichung:

$$b = \frac{h}{N} = h \cdot \frac{1}{\left(\frac{1}{(1-\text{Ülp})}\right)} = h \cdot (1 - \text{Ülp}) \quad (3-5)$$

Die maximale Anzahl der Pulse pro Flächenelement ergibt sich aus dem ÜLP. Dieser stellt den sich überlappenden, auf 1 normierten, prozentualen Anteil der Maskenausdehnung von zwei aufeinander folgender Pulse in Vorschubrichtung dar. Im Allgemeinen staucht der Faktor  $b$  den Wertebereich und verkleinert somit die Maskenausdehnung in Vorschubrichtung. Die Iteration über alle Elemente  $i$  und  $j$  der Matrix entspricht einer einseitigen Beschneidung des Maskenbereichs durch die cos-Funktion. In Abbildung 3-5 ist dies schematisch dargestellt.



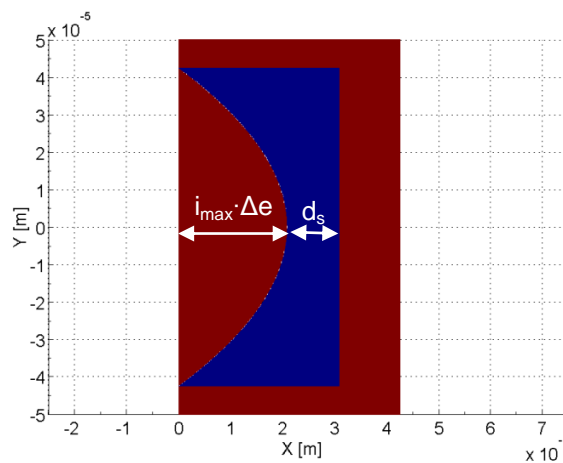
**Abbildung 3-5:** Schematische Darstellung einer Matrix mit den gekennzeichneten Größen.

Alle Elemente, die die Gleichung (3-3) erfüllen, werden Null gesetzt. Den Elementen, die die Gleichung (3-3) nicht erfüllen, wird ein negativer Abtragswert zugewiesen. Der Abtragswert kann entweder fest oder als Funktion von  $i$  und  $j$  gewählt werden. Des Weiteren erfolgt eine Abgrenzung der Maskengeometrie durch die Gleichungen:

$$i > i_{\max} + N_s \quad (3-6)$$

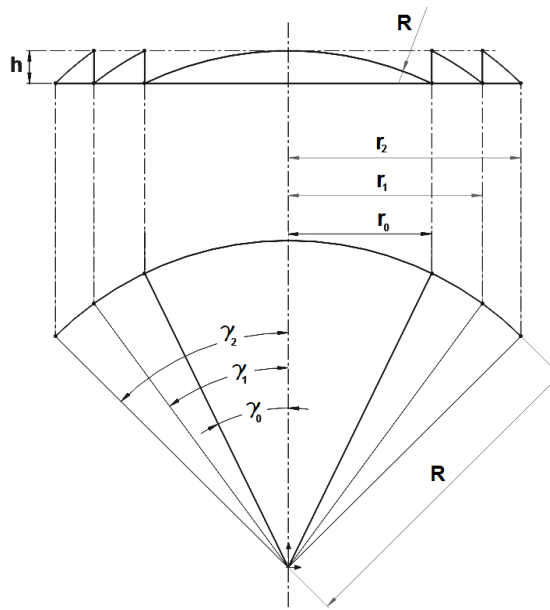
$$i_{\max} = \frac{b}{N_r \cdot \Delta e} \cdot (1 - \cos(\gamma)) \quad (3-7)$$

Alle Elemente  $(i,j)$ , die die Gleichung (3-6) erfüllen werden ebenfalls Null gesetzt, andernfalls auf den Abtragswert. Der Parameter  $N_s$  entspricht einer Anzahl an Elementen, welche sich aus dem Scheitelabstand  $d_s$  und der Elementgröße ergibt. Der Scheitelabstand kennzeichnet den Abstand der Beschneidungsfunktionen für  $j = 1$  (siehe Abbildung 3-6) und ist dann von Bedeutung, wenn die Struktur im Gesamten tiefer in das Substrat eingebracht werden soll [Büt15a]. Des Weiteren muss der Scheitelabstand  $d_s$  so gewählt werden, dass die minimale Auflösungsgrenze von theoretisch  $0,5 - 1 \mu\text{m}$  (Abbildungsebene) nicht unterschritten wird, um die Geometrie korrekt auf das Werkstück zu übertragen. Der Parameter  $i_{\max}$  beschreibt den maximalen auf  $N_r$  normierten Funktionswert, welcher durch das Teilen durch die Elementgröße in eine äquivalente Anzahl Elemente umgerechnet wird. Die Bedingung entspricht der Beschneidung des Maskenbereichs mit einer Geraden (siehe Abbildung 3-5). Das Ergebnis ist eine Matrix bestehend aus  $p \times q$  Elementen mit dem Wert der Abtragstiefe innerhalb und dem Wert 0 außerhalb des Maskenbereichs. Eine derart berechnete Matrix ist in Abbildung 3-6 dargestellt, der blaue Bereich entspricht dem Maskenbereich.



**Abbildung 3-6:** Darstellung der Maskenmatrix für eine  $85 \mu\text{m}$  breite Zylinderlinse in der Abbildungsebene.

Im Folgenden soll die Maskenberechnung für die Erzeugung von Fresnel-Zylinderlinsen erweitert werden. Dabei wird wie bei der Berechnung für die Mittellinse vorgegangen. Ausgehend von den Linsenparametern werden die Zonenwinkel  $\gamma_l$  aus dem Krümmungsradius und dem Abstand  $r_l$  der Zone  $l$  berechnet. Zu Veranschaulichung kann die Fresnel-Linse als eine Kombination aneinander gesetzter Kreissektoren aufgefasst werden, die von Zone zu Zone um den Wert  $h$  in vertikaler Richtung versetzt sind (siehe Abbildung 3-7).



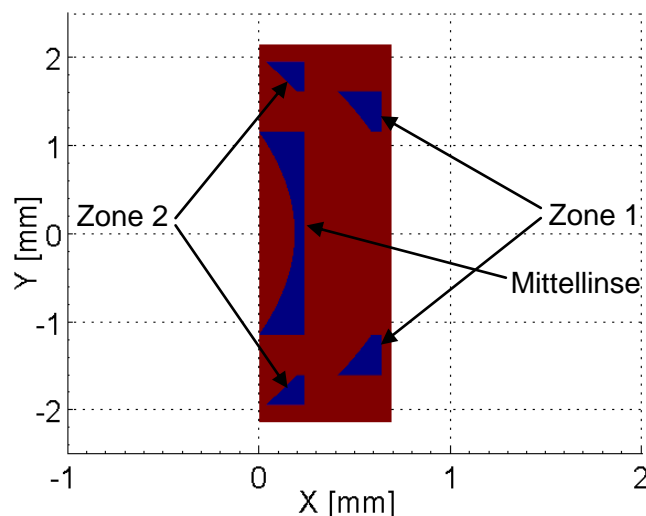
**Abbildung 3-7:** Parameter der Fresnel-Linse und äquivalente Kreissektoren.

Mit den Aperturen  $d_l$  und dem Radius können die entsprechenden Zonenwinkel berechnet werden. Der Index  $l$  kennzeichnet die jeweilige Zone, beginnend bei der Mittellinse mit dem Index  $l = 0$ . Die Berechnung der Maskenmatrix erfolgt in  $l$  Schritten durch die Unterteilung der Matrix in eine entsprechende Anzahl an Bereiche. Deren Größe wird durch die Elementzahl der halben Aperturen  $N_{rl}$  begrenzt. Die Iteration erfolgt für jeden Bereich von  $N_{rl}$  bis  $N_{r(l+1)}$ . Die cos-Funktion wird mit jedem  $l$  um den Wert für den Winkel  $\gamma_l$  in Richtung  $+y$  verschoben, sodass die Funktion in dem Bereich zwischen den begrenzenden Aperturen positive Werte annimmt. Folglich lautet die Bedingung für das Setzen des Abtragswertes:

$$i \cdot \Delta e \leq \frac{b}{N_{rl}} \cdot \left( \cos\left(\frac{j \cdot \gamma_l}{N_{rl}}\right) - \cos(\gamma_l) \right) \quad (3-8)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n \quad j = N_{rl}, \dots, N_{r(l+1)}$$

Die Abgrenzung des Maskenbereichs erfolgt für jede Zone wie bei der Mittellinse durch Gleichung (3-6). Die Masken werden in der Abbildungsebene berechnet, d.h. die Matrix muss zur Ermittlung der tatsächlichen Maße bzw. Form um den Abbildungsmaßstab vergrößert und in die Maskenebene transformiert werden. Dies erfolgt durch die Multiplikation der berechneten Matrix mit einer Einheitsmatrix gleicher Größe, deren Elementgröße in jeder Richtung um den Abbildungsmaßstab  $\beta = 26,67$  vergrößert wurde. Eine nach dieser Methode berechnete Matrix ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Die Maske wurde für eine Fresnel-Zylinderlinse mit 2 Fresnel-Zonen berechnet.



**Abbildung 3-8:** Darstellung der Maskenmatrix für eine Fresnel-Zylinderlinse mit zwei Zonen, (Maskenebene).

Die blauen Bereiche kennzeichnen die jeweiligen Maskenbereiche für die Mittellinse, 1. und 2. Fresnel-Zone. Die Maskenbereiche für die Zone 1 sind versetzt angeordnet, da eine durchgehende Maske, geschnitten in 50  $\mu\text{m}$  dicke Tantalfolie, keine ausreichende Formstabilität aufweisen würde.

### 3.2.2 Berechnungsmethode 2

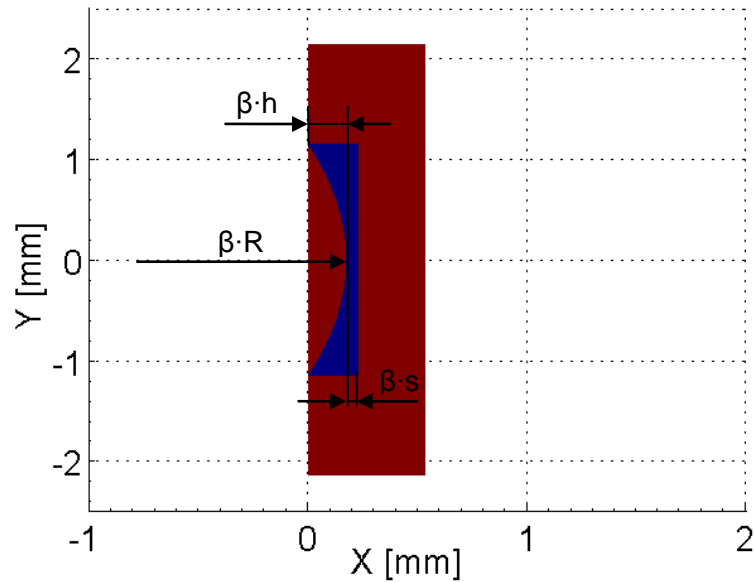
Die zweite Berechnungsmethode ist wesentlich einfacher als die erste, da sie auf den fest vorgegebenen Werten der Linsen beruht. Die Berechnung erfolgt in diesem Falle durch die Übertragung der Linsengeometrie auf die Maske. Der Maskenbereich wird anstelle einer skalierten cos-Funktion durch einen Kreis beschnitten, dessen Radius dem Krümmungsradius der Linse entspricht. Dieser wird um  $|R - h|$  aus dem Koordinatenursprung herausgerückt, sodass der Maskenbereich nur durch einen Teil des Kreises beschnitten wird. Aufgrund dessen werden diese Art Masken im Folgenden als Teilkreismasken bezeichnet. Wie bereits bei der ersten Methode beschrieben, erfolgt

auch bei dieser Methode die Zuordnung der Abtragswerte durch die iterative Überprüfung der Matrixelemente. Die Gleichung

$$(i + N_R - N_h)^2 + j^2 > N_R^2 \quad (3-9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, p \quad j = 1, 2, 3, \dots, q$$

dient dabei der Zuordnung des Abtragswertes in Abhängigkeit von der Position der Elemente(i,j). Für die Überprüfung erfolgt im Vorhinein eine Umrechnung des Krümmungsradius und der Höhe in eine äquivalente Anzahl an Elemente  $N_R$  und  $N_h$ , indem der jeweilige Parameter durch die Elementgröße geteilt wird. In Abbildung 3-9 ist die Maskenmatrix einer solchen Teilkreismaske für eine Zylinderlinse dargestellt.



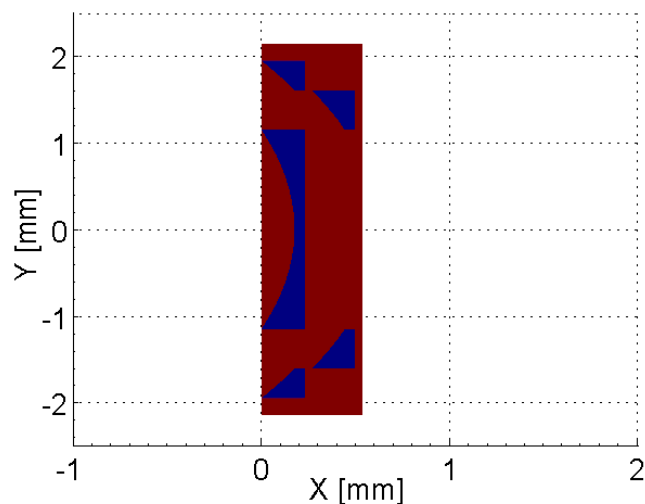
**Abbildung 3-9:** Darstellung der Maskenmatrix einer Teilkreismaske für eine Zylinderlinse (Maskenebene).

Die Erzeugung der Maskenbereiche für die Fresnel-Zonen erfolgt auf gleiche Art und Weise. Für jede Zone wird jedoch aufgrund der einfacheren Handhabung eine separate Matrix berechnet, alle Matrizen werden im Anschluss addiert. Der Algorithmus muss für die Zonen-Masken nur minimal abgeändert werden bzw. kann die Gleichung (3-9) mit  $l$  zu

$$(i + N_R - (l + 1) \cdot N_h)^2 + j^2 > N_R^2 \quad (3-10)$$



verallgemeinert werden. Für jede Zone kann somit der Maskenbereich mit dem entsprechenden Kreisausschnitt beschnitten werden. Die Iteration erfolgt über die entsprechenden Zonengrenzen  $N_{rl}$  und  $N_{r(l+1)}$ . Durch die separate Berechnung der Zonen-Masken ist ein nachträgliches Verschieben der einzelnen Maskenbereiche durch die gegebene Funktion `circshift()` möglich, ohne neue Verschiebungsparameter einzuführen. Nach der Berechnung, Verschiebung und Addition der Matrizen wird die resultierende Matrix gespiegelt und in die Maskenebene transformiert. Das Ergebnis ist eine Matrix wie sie in Abbildung 3-10 dargestellt ist.



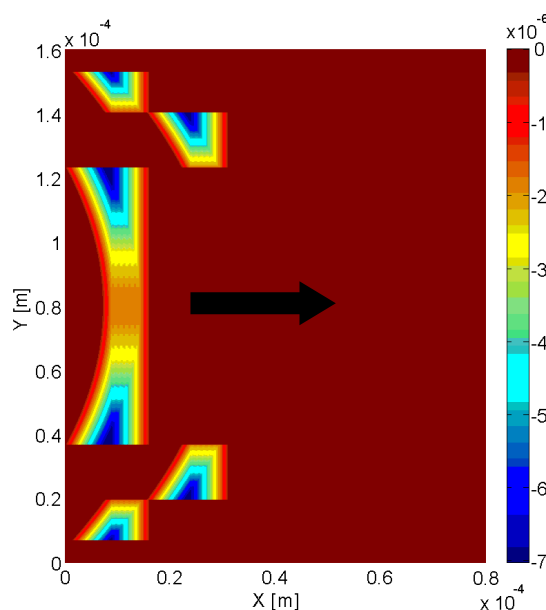
**Abbildung 3-10:** Darstellung der Maskenmatrix einer Teilkreismaske für eine Fresnel-Zylinderlinse mit 2 Zonen in der Maskenebene.

Der blaue Bereich kennzeichnet den transmittierenden Bereich der Maske, die Kanten der linken Seite der Maskenbereiche weisen alle den gleichen Radius auf. Die erzeugten Maskengeometrien werden anschließend in die entsprechend nötigen Dateiformate konvertiert und mittels Ultrakurzpuls-Laser in Tantalfolie geschnitten. Durch anschließende Strukturierungsversuche kann die Funktionsfähigkeit der Masken überprüft werden.

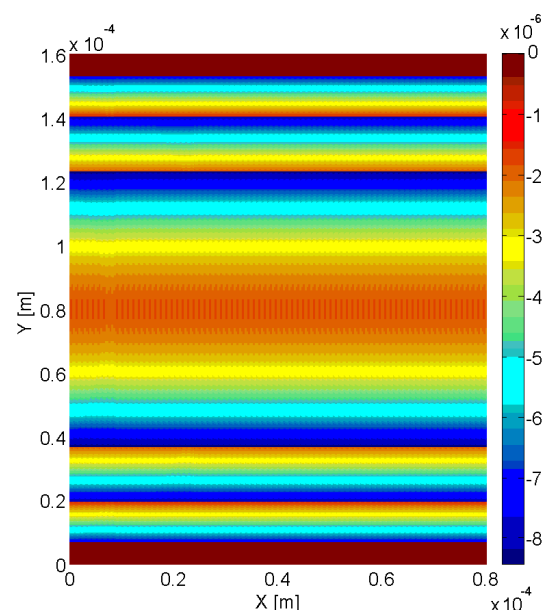
### 3.2.3 Simulation mit berechneten Masken

Mit den berechneten Masken kann der Strukturierungsprozess in Form von Matrizenoperationen nachgestellt werden. Die erzeugten Ergebnismatrizen liefern eine Aussage über geeignete oder ungeeignete Bearbeitungsparameter. Wie auch im realen Prozess, werden in der Simulation die Zylinderlinsen durch das mehrmalige überlappende Aneinandersetzen von Einzelabträgen erzeugt bzw. berechnet. Ausgehend von einer Maskenmatrix die als Ergebnismatrix gekennzeichnet wird, wird dieser Prozess durch

das Verschieben der Spaltenvektoren mit der Funktion `circshift()` realisiert. Dabei erfolgt nach jedem Verschieben der Maskenmatrix die Verrechnung mit der Ergebnismatrix. Da allen Elementen innerhalb des Maskenbereichs ein negativer Abtragswert zugeordnet wurde, addieren sich die Abtragswerte gemäß der Anzahl der Einzelabträge. Diese hängen wiederum von der Maskenausdehnung in der entsprechenden Zeile der Maskenmatrix und dem ÜLP ab. Die Richtung der Verschiebung entspricht der Vorschubrichtung (siehe Abbildung 3-11 schwarzer Pfeil) bei der Strukturierung. Aus Abbildung 3-11 ist deutlich erkennbar, dass sich quer zur Vorschubrichtung (y-Richtung) ein Höhenprofil ausbildet.



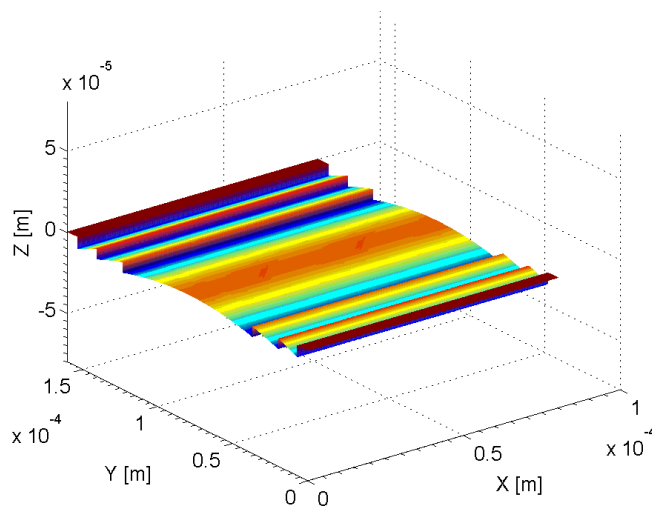
**Abbildung 3-11:** Darstellung der berechneten Ergebnismatrix nach 50 Verschiebungen.



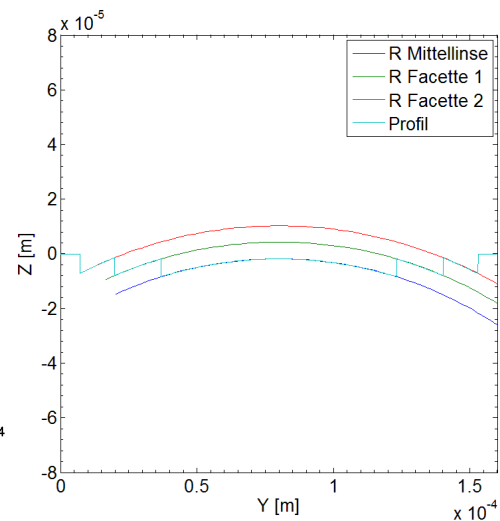
**Abbildung 3-12:** Darstellung der berechneten Ergebnismatrix nach 532 Verschiebungen (entspricht der Verschiebung bis Ausgangsposition wieder erreicht ist).

Diese Operation wird solange durchgeführt, bis der Maskenbereich wieder in der Ausgangsposition ist (siehe Abbildung 3-12). Die Funktion `circshift()` verschiebt die Zeilen- und/oder Spalten-Vektoren vom Ende der Matrix zum Anfang, sodass sich eine Matrix der Größe  $p \times q$  nach  $p$  bzw.  $q$  Verschiebungen um je 1 Element wieder im Ausgangszustand befindet. Das bedeutet, dass die Auswirkungen von 2 oder mehreren Überfahrten für verschiedene Abtragswerte, Pulsüberlappungen und verschiedenen Geometrien simuliert werden kann. Eine so erzeugte Ergebnismatrix kann, durch das Auslesen von Spaltenvektoren an einer beliebigen Stelle  $x$  bezüglich des entstandenen Profils ausgewertet werden. Die berechnete Ergebnismatrix entspricht der Oberfläche der Struktur, in Abbildung 3-13 ist diese dreidimensional dargestellt. Die Spaltenvektoren

ren beinhalten die Höhenwerte des Profils (vgl. Abbildung 3-14). Die Auswertung erfolgt durch das Zerlegen des Profils in die jeweiligen Zonen. Die y- und z-Koordinaten einer Zone werden zu einem neuen Vektor zusammengefasst und an eine Fit-Funktion übergeben. Diese berechnet den Radius und die Mittelpunktkoordinaten für die übergebenen Vektoren. Dadurch kann für jede Zone der Krümmungsradius ermittelt werden. Die Abbildung 3-14 zeigt einen Profilschnitt der in Abbildung 3-13 dargestellten Oberfläche. Neben dem Profil sind in Abbildung 3-14 die ermittelten Radien für die jeweilige Zone eingezeichnet.



**Abbildung 3-13:** 3D-Darstellung der Ergebnismatrix.



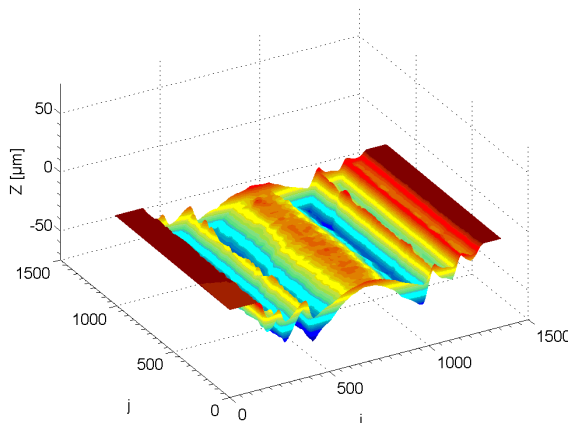
**Abbildung 3-14:** Profilschnitt entlang der y-Achse der Ergebnismatrix, mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion.

Anhand der ermittelten Radien kann eine Anpassung der Maskengeometrie und der Bearbeitungsparameter erfolgen, sodass die optimalen Maskengeometrien zur Herstellung von Linsen mit definierten Radien berechnet werden können.

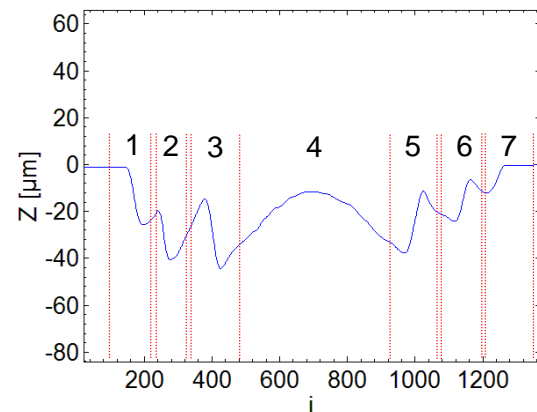
### 3.2.4 Auswertung strukturierter Linsen

Die hergestellten Linsen werden mit dem Konfokalmikroskop C1 der Firma Confovis untersucht. Ein Konfokalmikroskop detektiert nur die Strahlung aus der Fokusebene. Licht, dessen Quelle sich nicht im Fokus des abbildenden optischen Systems befindet, wird durch konfokale Blenden in einem Zwischenfokus ausgeblendet. Durch das Verschieben des Fokus in Z-Richtung und der Aufnahme des Bildes an der jeweiligen Z-Position kann eine 3D-Struktur durch die Detektion der an einer Oberfläche gestreuten Strahlung aufgenommen werden. Die Beleuchtung der Probe erfolgt durch das Objektiv. Die Aufnahme erfolgt in digitaler Form und wird mit der entsprechenden Mikroskop-Software zu einer 3D-Darstellung aufbereitet. Die einzelnen Messpunkte liegen somit

in Form von  $x$ ,  $y$  und  $z$ -Koordinaten vor und können im ASCII-Format exportiert werden. Die exportierten Dateien werden im Anschluss in ein für die Auswertung entwickeltes Programm geladen. Die  $x$ ,  $y$  und  $z$ -Werte, welche im Auswertungsprogramm wieder in Form einer Matrix vorliegen, können zeilen- bzw. spaltenweise ausgewertet werden. Dabei wird ähnlich vorgegangen wie bei der Auswertung der berechneten Oberflächen. In einem ersten Schritt wird das Profil mit einem Filter geglättet, um die Profilform von der Rauheit zu trennen und Maxima sowie Minima eindeutig zu erkennen. Des Weiteren wird ein gefiltertes Schnittprofil der Oberfläche dargestellt. Aufgrund dessen, dass die Linsen bei der Aufnahme nicht immer die gleiche Position haben und die lokalen Extrempunkte unterschiedlich ausgeprägt sind, wird das geglättete Schnittprofil in Bereiche unterteilt. Die Unterteilung dient dazu, die jeweiligen Indices für die Extrempunkte zu finden. Die Eingrenzung der Bereiche erfolgt auch durch die Angabe von Indices, welche dem geglätteten Profilschnitt (vgl. Abbildung 3-16) entnommen werden können.



**Abbildung 3-15:** Gefilterte Oberfläche einer mittels Konfokalmikroskop aufgenommenen Fresnel-Zylinderlinse.



**Abbildung 3-16:** Profilschnitt der gefilterten Oberfläche, unterteilt in 7 Bereiche.

Mit den ermittelten Indices der lokalen Extrema kann das Profil zeilenweise in die Bereiche der Fresnel-Zonen zerlegt und wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, zonenweise bezüglich des Krümmungsradius ausgewertet werden. Dabei wird das geglättete Profil nur zur Ermittlung der Indices verwendet, an die Fit-Funktion werden die ungefilterten Profildaten übergeben. Die Radien aller Zonen können über eine variable Anzahl an Zeilen gemittelt werden. Deren Anzahl ist nur durch die Größe der Aufnahme mit 1019 Messpunkten in  $y$ -Richtung begrenzt. Aufgrund des Rechenaufwands bzw. der Rechenzeit werden nicht alle, sondern nur 200 Zeilen ausgelesen, was einer Strecke von  $25\text{ }\mu\text{m}$  in Vorschubrichtung entspricht. Die Größe der Matrix und deren Matrixelemente ist fest durch das Mikroskop vorgegeben und für jede Aufnahme gleich.

Die berechneten Radien der Zeilen werden gemittelt und die Standardabweichung berechnet. Somit kann eine Aussage über die Größe und das Verhältnis der Radien der Zonen zueinander und deren Schwankung in Strukturierungsrichtung getroffen werden. Des Weiteren werden die hergestellten Linsen bezüglich ihrer Oberflächenrauheit untersucht. Die Rauheitsmessung erfolgt mit der Software MountainsMap® der Firma Digital Surf nach ISO 25178. Gemessen wird die quadratisch gemittelte Flächenrauheit  $S_q$ . Um die Rauheit von der Welligkeit zu trennen bzw. die Krümmung der Flächen nicht in die Rauheitsmessung mit einzubeziehen, werden die Flächen mit einem Gaußfilter ( $\lambda_c = 25 \mu\text{m}$ ) nach ISO 11562 gefiltert, demnach die Mikrorauheit der Oberfläche gemessen [Dig12, DIN12].

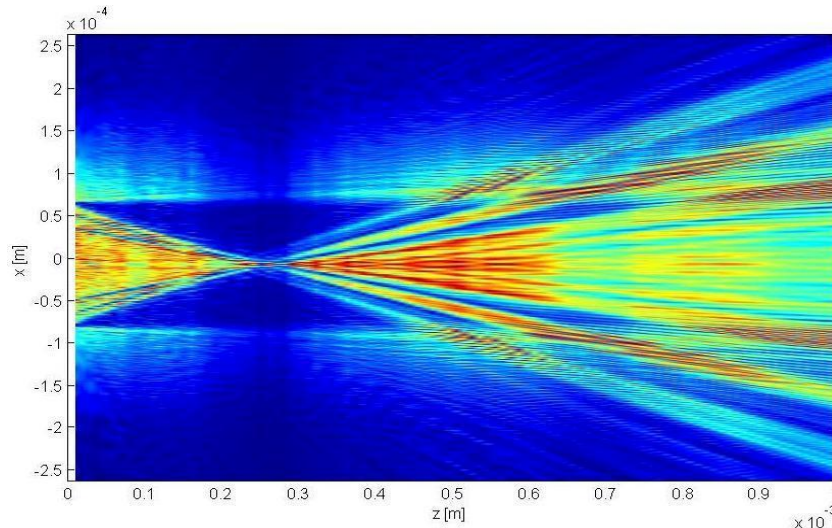
### 3.2.5 Berechnung und Messung der optischen Wirkung

Für die Untersuchung der optischen Wirkung der Linsen sollen im Folgenden zwei Möglichkeiten vorgestellt werden. Je nachdem, wie die Qualitätsprüfung bei einer eventuellen Serienfertigung der Linsen gestaltet werden soll, kann das geeignetere beider Verfahren gewählt oder beide kombiniert werden. Die hergestellten Linsen werden nach der Fertigung zur Charakterisierung von Formgenauigkeit und Oberflächengüte vermessen und liegen jeweils als Matrix vor. Aus den Oberflächendaten kann die optische Wirkung der Linsen auf Basis des Huygens-Fresnel'sche Prinzip und dessen Formulierung als Fresnel-Kirchhoff'sches Beugungsintegral berechnet werden (siehe Kapitel 2.3.1). In einem ersten Schritt erfolgt die Berechnung der Feldstärkeverteilung in der Abstrahlebene. Dabei wird angenommen, dass die Feldstärke gaußverteilt ist. Da nur die Verteilung der Feldstärke von Interesse ist, wird die Ausgangsfeldstärke auf  $E = 1 \text{ V/m}$  gesetzt. Ausgehend vom Schnittprofil der aufgenommenen Oberfläche kann mit Hilfe des Brechungsindex  $n$  des Materials für die entsprechende Wellenlänge jedem Element des Profils eine Phase  $\Phi(x)$  gemäß der Gleichung (2-12) zugeordnet werden. Aus der Gleichung

$$E(x) = E \cdot e^{-\left(\frac{x^2}{w_0^2}\right)} \cdot e^{i\Phi(x)} \quad (3-11)$$

ergibt sich die Feldstärkeverteilung  $E(x)$ , deren Elementen eine ortsabhängige Phase zugeordnet wurde,  $w_0$  kennzeichnet den Radius der Strahltaile des angenommenen Gaußstrahls. Die Berechnung kann auf gleichem Wege für die simulierten Linsen erfolgen. Ausgehend von der Feldstärkeverteilung  $E(x)$  in der Abstrahlebene, erfolgt die Berechnung der Feldstärke in der  $xz$ -Ebene mit Gleichung (2-10) und Gleichung (2-11). In Abbildung 3-17 ist die berechnete Feldstärkeverteilung für eine Fresnel-Linse in Ausbreitungsrichtung dargestellt. Die Lage des Fokus kann einerseits aus der Darstellung und andererseits durch die Ermittlung des Maximums der Feldstärke ermittelt

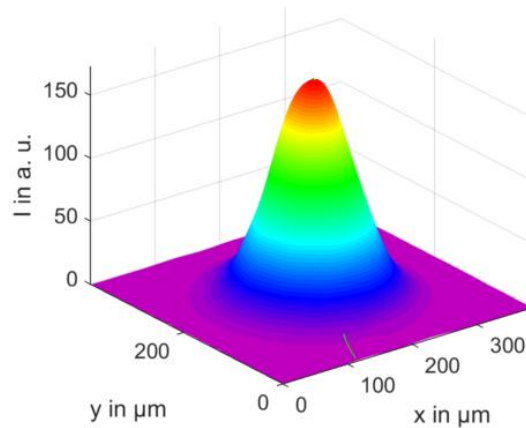
werden. Des Weiteren ist aufgrund der Proportionalität von Feldstärke und Intensität die Berechnung des qualitativen Intensitätsverlaufs im Fokus möglich. Die Berechnungen erfolgen für eine Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  und der mittels Cauchy-Koeffizienten ermittelten Brechzahl  $n = 1,5264$  (siehe Kapitel 3.1.1).



**Abbildung 3-17:** Berechneter Feldstärkeverlauf einer Fresnel-Linse in Ausbreitungsrichtung.

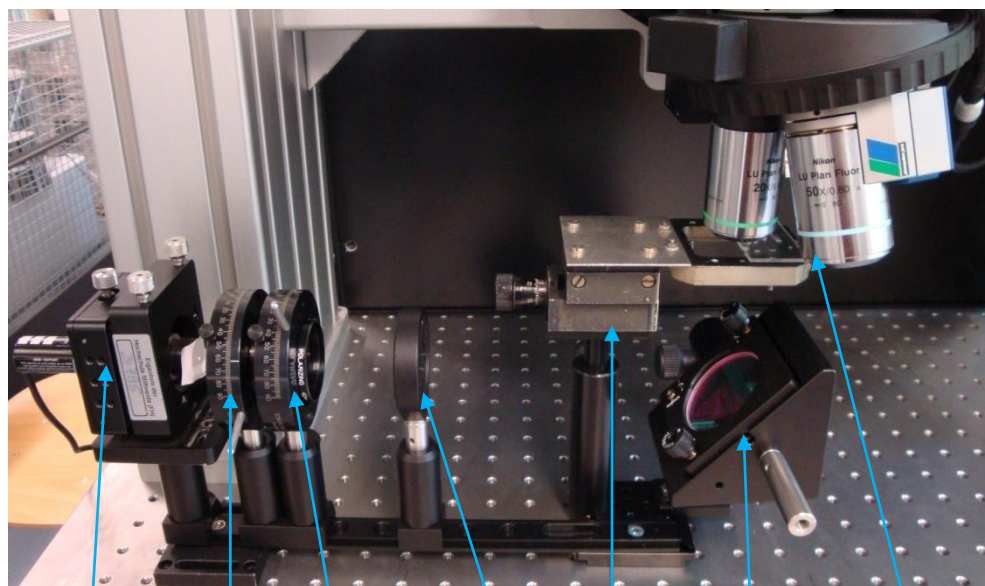
Die Vermessung der Brennweite kann mit dem in Abbildung 3-19 dargestellten Aufbau erfolgen. Dieser umfasst einen frequenzverdoppelten Nd:YAG-Laser, einen Polarisator, einen Analysator, eine Linse, einen Spiegel und einen xy-Tisch. Die eigentliche Messung wird mit dem Konfokalmikroskop durchgeführt. Der Laser emittiert bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  im kontinuierlichen Betrieb, mit einer Maximalleistung von  $P_{\text{max}} = 50 \text{ mW}$ . Die Strahlqualität des Lasers wurde durch die Vermessung der Kaustik mit  $M^2 = 1,3$  ermittelt, die Intensität ist über den Strahlquerschnitt gaußverteilt (siehe Abbildung 3-18). Aufgrund der hohen Leistung kann es zu Beschädigungen des Kamera-Chips kommen, demzufolge muss der Laser abgeschwächt werden. Dies wird durch den Einsatz einer Polarisator-Analysator-Anordnung realisiert. Durch das Verdrehen von Polarisator und Analysator kann die Intensität des Laserstrahls so weit verringert werden, dass der Kamera-Chip im Fokus der Linsen nicht übersteuert. Für die Berechnungen wird immer von einer ebenen Wellenfront ausgegangen, deren Phase allein durch die Linse moduliert wird. Um dies zu realisieren, wird der Laser nach der Abschwächung auf dem Substrat fokussiert, da die Wellenfront im Fokus als eben angenommen werden kann.





**Abbildung 3-18:** Intensitätsverteilung des fokussierten Laserstrahls ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $f = 300 \text{ mm}$ ).

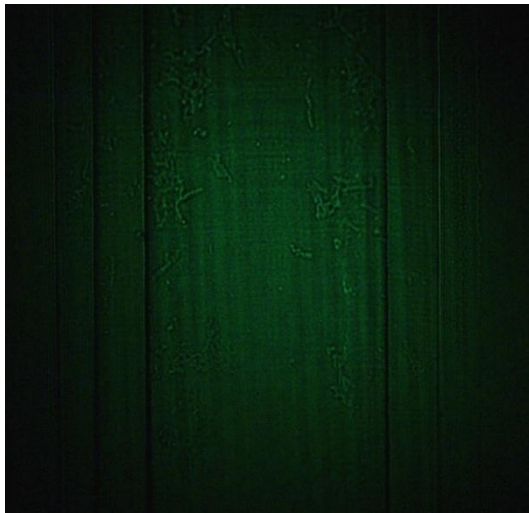
Des Weiteren dient die Fokussierung der Verkleinerung des Tailenradius auf  $w_0 = 90 \mu\text{m}$  ( $f = 250 \text{ mm}$ ). Der Wert wurde aus den Messwerten für eine Brennweite von 300 mm mittels eines wellenoptischen Simulationsprogramms für eine Brennweite von 250 mm berechnet. Die Substrate mit den eingebrachten Linsen werden auf dem xy-Tisch befestigt und können mit dessen Hilfe zum Laserstrahl justiert werden. Die Justage erfolgt durch die gleichzeitige Beobachtung mit dem Konfokalmikroskop, so dass eine genaue Positionierung von Laserstrahl und Linse möglich ist.



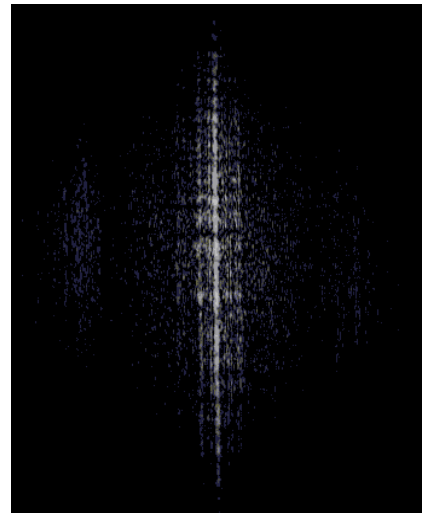
Laser Polarisator Analysator Linse XY-Tisch Spiegel Konfokalmikroskop

**Abbildung 3-19:** Aufbau zur Vermessung der Brennweite der hergestellten Linsen.

Zur Vermessung der Fokusposition wird das Mikroskop so eingestellt, dass die Substratoberfläche scharf abgebildet wird und sich somit in der Fokalebene des Mikroskops befindet. Beim Verfahren der z-Achse des Mikroskops in positive Richtung wird nur das Licht aus der jeweiligen z-Ebene auf dem Kamera-Chip abgebildet. Mit zunehmender Annäherung an die Fokusposition kann eine Konzentration des Lichtes in bestimmten Bildbereichen beobachtet werden. Beim Überfahren der Fokusposition laufen diese Bereiche wieder auseinander. Der Fokus befindet sich an der Stelle, an der die höchste relative Intensität gemessen wird. Der Abstand zur Oberfläche kann über die Positionsanzeige der z-Achse des Mikroskops abgelesen werden. In Abbildung 3-20 ist Oberfläche einer Fresnel-Zylinderlinse dargestellt, die mit einem frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers durchstrahlt wurde. Die Position von Laserstrahl und Linse wurde so gewählt, dass die Linse möglichst symmetrisch ausgeleuchtet wird. In Abbildung 3-21 ist eine Konfokalmikroskopaufnahme an der Position des Fokus dargestellt. Durch eine Schnittdarstellung kann die Intensitätsverteilung angezeigt werden.



**Abbildung 3-20:** Konfokalmikroskop-Aufnahme einer zum Laserstrahl justierten Fresnel-Zylinderlinse.



**Abbildung 3-21:** Konfokalmikroskop-Aufnahme im Fokus der Fresnel-Zylinderlinse (Gauwertbild).

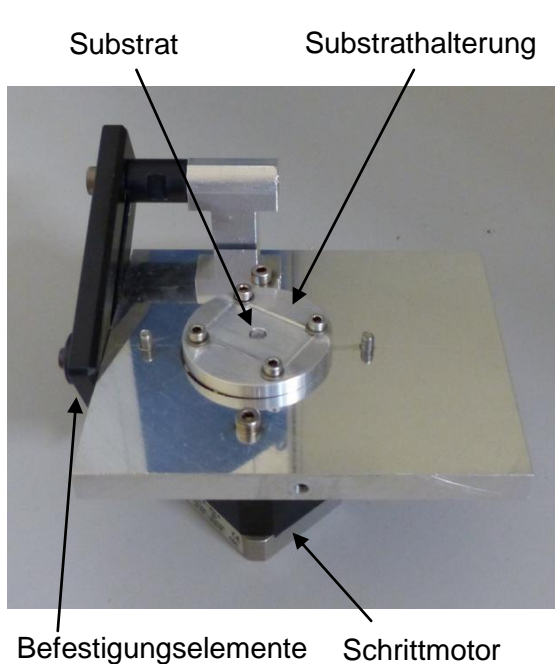
Das im Fokus aufgenommene RGB-Bild kann mittels eines entwickelten Programmmoduls in ein Grauwertbild umgerechnet und die relative Intensitätsverteilung durch das zeilenweise Auslesen der Bildpunkte ermittelt werden. Die Grauwerte werden im Anschluss auf 1 bzw. auf einen gleichen Leistungseinschluss normiert, sodass die gemessene und die berechnete Intensitätsverteilung zueinander ins Verhältnis gesetzt werden können.



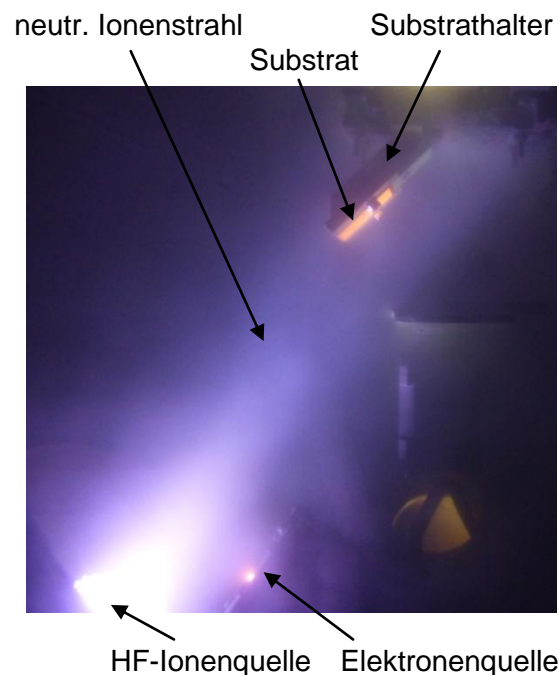
### 3.2.6 Nachbehandlung der Strukturen

Bedingt durch den Herstellungsprozess, verbleibt auf den Strukturen Debris, welches durch einen oder mehrere zusätzliche Schritte entfernt werden muss. Anhaftendes Debris bewirkt eine Erhöhung der Streuung des Lichtes und somit eine Verminderung der optischen Qualität [Pfe12]. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass Fehler in der Strukturierung vom Debris überdeckt werden. Dies gilt insbesondere auch für die Oberflächenrauheit, die dadurch verfälscht werden kann. Für die Reinigung der Strukturen stehen mehrere Verfahren zur Verfügung. Die grobe Reinigung erfolgt im Ethanol-Ultraschallbad, dessen Wirkung jedoch nicht ausreichend ist um das Debris vollständig zu beseitigen. Dieses Verfahren ist nur zur Vorreinigung der Strukturen geeignet. Zur Untersuchung stehen des Weiteren die Reinigung mittels Trockeneis und das Ionenstrahlpolieren, sowie das Ätzen mittels Kaliumhydroxid-Lösung (KOH).

Bei der Reinigung mit Trockeneis werden Trockeneiskristalle durch Druckluft auf die Substratoberfläche beschleunigt. Die abrasive Wirkung der Kristalle beim Auftreffen auf der Oberfläche soll das Debris von den Strukturen lösen. Beim Ionenstrahlpolieren wird die Substratoberfläche mit schweren Argon-Ionen beschossen. Dies erfolgt unter einem sehr großen Einfallswinkel von  $80^\circ$  zur Oberflächennormalen, wodurch eine Glättung erzielt werden soll. Für die Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Aufbauten mit unterschiedlichen Ionenquellen gewählt. Zum Einsatz kommen eine Kaufmann-Ionenquelle und eine durch Hochfrequenz angeregte Ionenquelle (HF-Ionenquelle). Um Isolatoren bearbeiten zu können, ist es erforderlich den Ionenstrahl zu neutralisieren, da sich sonst vor dem Substrat eine Raumladungszone bildet, die die Ionen von der Oberfläche abschirmt. Demnach muss der Beschuss mit Neutralteilchen, also Atomen erfolgen. Bei der Kaufmann-Ionenquelle wird dies durch einen Glühdraht aus Wolfram realisiert, welcher durch den Ionenstrahl verläuft. Die Elektronen gelangen durch Glühemission in den Ionenstrahl. Die zweite Möglichkeit ist die Neutralisation mit einer Elektronenquelle, welche quer zum Ionenstrahl ausgerichtet ist und die Elektronen direkt in den Ionenstrahl schießt. Diese Art der Neutralisation wird bei der HF-Ionenquelle angewendet. Es ist davon auszugehen, dass die Stärke der Wechselwirkung der Teilchen mit der Substratoberfläche im Allgemeinen vom Neutralisationsgrad abhängt. Des Weiteren unterscheiden sich die Aufbauten bezüglich der Substrathalterung. Im ersten Aufbau wird das Substrat auf einer speziell angefertigten Halterung befestigt. Die Halterung selbst kann auf einen Schrittmotor montiert und somit während der Bearbeitung in Rotation versetzt werden. In Abbildung 3-22 ist die Halterung mit Motor und Befestigungselementen dargestellt.



**Abbildung 3-22:** Vorrichtung zum Ionenstrahlpolieren mit Substratbewegung.



**Abbildung 3-23:** Aufbau zum Ionenstrahlpolieren. Die Neutralisation erfolgt durch den Einsatz einer Elektronenquelle.

Der Aufbau wird so positioniert, dass sich das Substrat vollständig im Ionenstrahl dreht. Dadurch sollen die Strukturen von allen Seiten gleichermaßen beschossen werden. Im zweiten Versuchsaufbau wird das Substrat starr zum Ionenstrahl positioniert, sodass ein einseitiger Teilchenbeschuss erfolgt (Abbildung 3-23). Die Reinigungsuntersuchungen werden sowohl an Zylinderlinsen als auch an Fresnel-Zylinderlinsen durchgeführt.

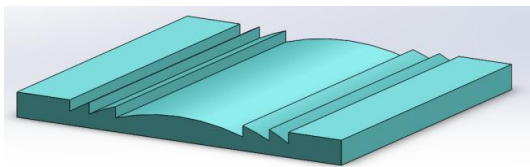
### 3.3 Fresnel-Linse und Masken-Designs

Die Überprüfung der Funktion der berechneten Masken soll anhand von Linsen definierter Größe erfolgen. Im Zuge dessen wurde eine Fresnel-Zylinderlinse entworfen, deren Abmessung sich in realistischen Größenordnungen bewegt. Die Größe der Linse richtet sich hierbei nach dem maximal nutzbaren Maskenbereich, welcher durch die Größe des homogenen Laserstrahls begrenzt ist. Dieser ist mit  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  kleiner als vorgesehen. Bedingt durch die Zerstörschwelle der Mikrospiegelarrays kann kein größerer homogener Fleck erzeugt werden. Dies bedeutet, dass die Maske zur Herstellung einer Linse mit einer Apertur von  $150 \text{ }\mu\text{m}$  gerade noch gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Für weiter außen liegende Bereiche, kann mit keinem homogenen Abtrag gerechnet werden. Die äußere Zone sollte demnach eine maximale Apertur von  $150 \text{ }\mu\text{m}$  aufweisen. Ausgehend von einer Brennweite von  $f = 275 \text{ }\mu\text{m}$  erfolgte die Berechnung der Zonenradien für eine Wellenlänge von  $\lambda = 850 \text{ nm}$ . Des Weiteren soll die Linse in der 4. Beugungsordnung arbeiten, wodurch die Zonenanzahl auf die Mittellinse und 2.

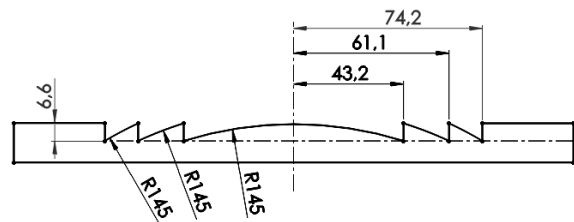
Fresnel-Zonen reduziert wurde. Dadurch ergeben sich wesentlich größere Abmessungen der Linsenkomponenten, sowohl lateral als auch in der Tiefe. Für kleinere Wellenlängen und Beugungsordnungen ergeben sich für den Durchmesser sehr viele kleine Zonen mit wenigen Mikrometern Breite. Eine Linse die für 532 nm Wellenlänge ausgelegt ist und in der 1. Beugungsordnung arbeitet, hat bei gleichem Durchmesser und gleicher Brennweite 18 Fresnel-Zonen. Für die oben genannten Parameter sind es lediglich zwei, was die Berechnung der Masken deutlich vereinfacht. Die Geometrie der entworfenen Linse wurde mit Hilfe der Gleichungen (2-2) und (2-5) berechnet. Der Krümmungsradius  $R$  wurde aus der Höhe  $h_{\max}$  und den Zonenradius  $r_1$  der Mittellinse über die Gleichung

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \quad (3-12)$$

berechnet. Ein Modell der Linse ist in Abbildung 3-25 dargestellt.

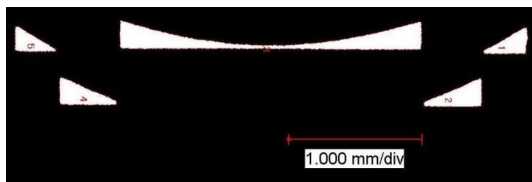


**Abbildung 3-24:** 3D-Darstellung eines computergenerierten Modells einer Fresnel-Zylinderlinse.

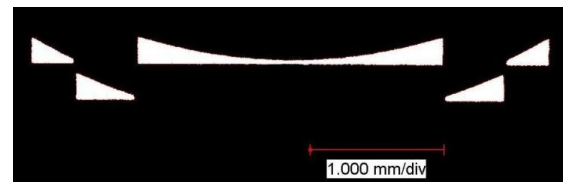


**Abbildung 3-25:** Schnittdarstellung der entworfenen Fresnel-Zylinderlinse (alle Maße in µm).

Die geometrischen Daten können aus Abbildung 3-26 entnommen werden. Für die Herstellung der Linsengeometrie wurden zwei Masken berechnet, eine auf Basis der Berechnungsmethode 1 und eine basierend auf Berechnungsmethode 2. In Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27 sind die in Tantalfolie geschnittenen Masken dargestellt.



**Abbildung 3-26:** Mikroskop-Aufnahme der in Tantalfolie geschnittenen cos-Maske.



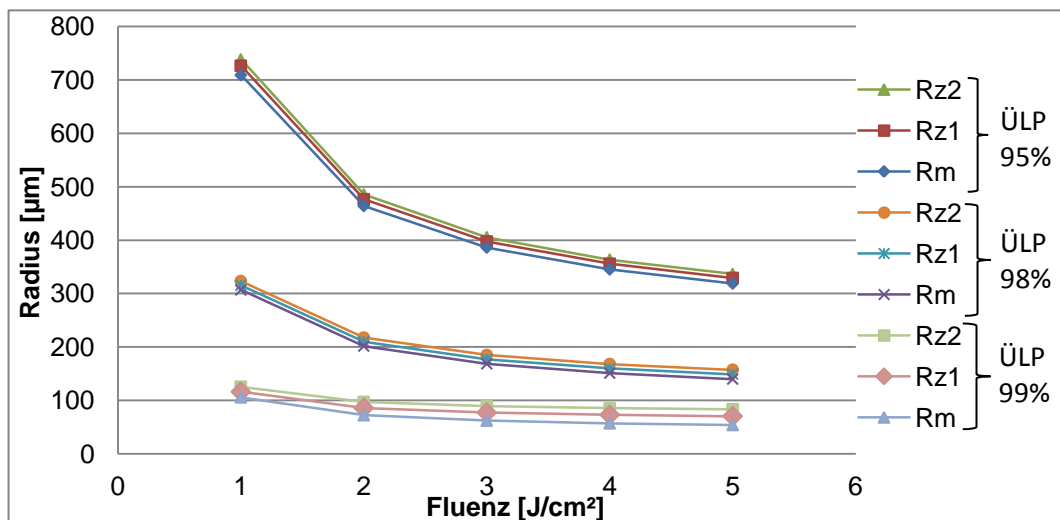
**Abbildung 3-27:** Mikroskop-Aufnahme der in Tantalfolie geschnittenen Teilkreismaske.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Ergebnisse der Simulation

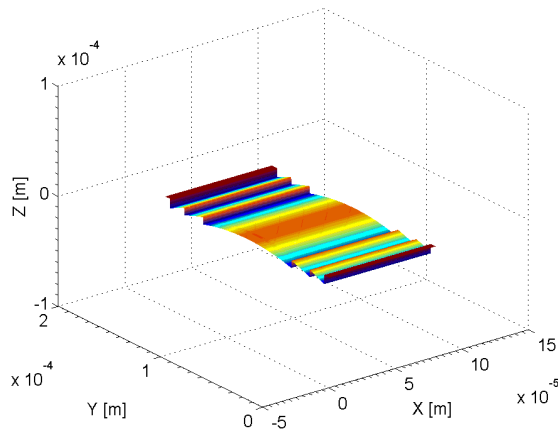
#### 4.1.1 cos-Maske

Für die berechnete cos-Maske wurden Simulationen durchgeführt, um die optimalen Bearbeitungsparameter abzuschätzen. Die berechneten Oberflächen wurden bezüglich der Krümmungsradien zonenweise ausgewertet. Aus Abbildung 4-1 ist zu entnehmen, dass sich der Bereich der Bearbeitungsparameter für die Erzeugung einer Oberflächen mit einem Krümmungsradius von  $R = 145 \mu\text{m}$  auf einen ÜLP von 98 % und einen Fluenzbereich von  $H = 4 - 5 \text{ J/cm}^2$  begrenzt.

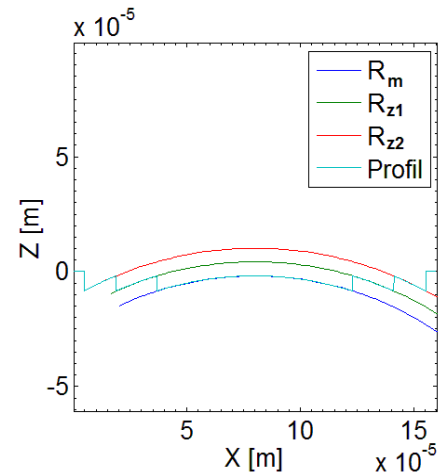


**Abbildung 4-1:** Krümmungsradien der Mittellinse  $R_m$  und der Fresnel-Zonen  $R_{z1}$  und  $R_{z2}$  in Abhängigkeit vom ÜLP und der Fluenz für die cos-Maske.

Die in Abbildung 4-1 aufgetragenen Radien der Mittellinse und der Fresnel-Zonen nehmen bei keinen der angenommenen Bearbeitungsparameter gleiche Werte an. Die Radien der Fresnel-Zonen sind im Allgemeinen größer als der Radius der Mittellinse. Für die berechnete Maske liegen die optimalen Parameter bei einem ÜLP von 98 % und einer Fluenz von  $H = 4,46 \text{ J/cm}^2$ . Bei diesen Parametern nimmt die Mittellinse den gewünschten Radius an. Die Fluenz entspricht einem Abtrag pro Puls von  $139,5 \text{ nm}$ , berechnet nach dem Lambert-Beer'schen-Gesetz und den in Kapitel 3.1.1 angegebenen Parametern. Die berechnete Oberfläche und deren Profilschnitt ist in Abbildung 4-2 bzw. Abbildung 4-3 dargestellt. Aus Abbildung 4-3 ist deutlich erkennbar, dass der Profilverlauf der Mittellinse und der Fresnel-Zonen sphärisch ist.

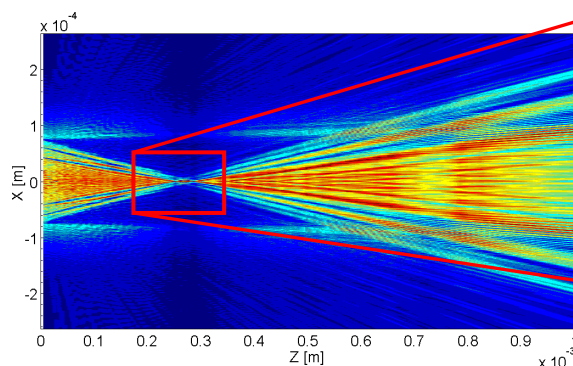


**Abbildung 4-2:** 3D-Darstellung der mit der cos-Maske berechneten Oberfläche.

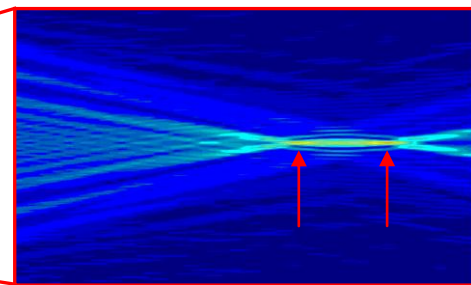


**Abbildung 4-3:** Profilschnitt der erzeugten Oberfläche mit eingezeichneten Krümmungsradien der Zonen.

Für die optimalen Parameter wurden die entstehenden Zonenradien mit  $R_{z1} = 154 \mu\text{m}$  und  $R_{z2} = 163 \mu\text{m}$  berechnet. Die Abweichungen können mehrere Ursachen haben. Einerseits besteht die Möglichkeit, dass die Maskengeometrie nicht korrekt berechnet wurde, sodass prinzipiell keine gleichen Radien entstehen können. Andererseits könnte die Ursache bei der Berechnung der Radien selbst liegen, da mit jeder weiteren Zone weniger Werte zur Ermittlung des Radius verwendet werden. Für eine korrekte Maskenberechnung müssen Fehler dieser Art ausgeschlossen werden. Die Erzeugung von Fresnel-Zonen mit gleichen Radien ist wichtig für die korrekte Funktion der Linsen. Zonen mit unterschiedlichen Radien führen zu Abbildungsfehlern wie aus Abbildung 4-4 bzw. Abbildung 4-5. erkennbar ist. Die Abbildungen zeigen die berechnete Feldstärkeverteilung in Ausbreitungsrichtung.



**Abbildung 4-4:** Berechnete Feldstärkeverteilung (Realteil, normiert) für die Simulierte Fresnel-Zylinderlinse in der xz-Ebene ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $n = 1,5264$ ).

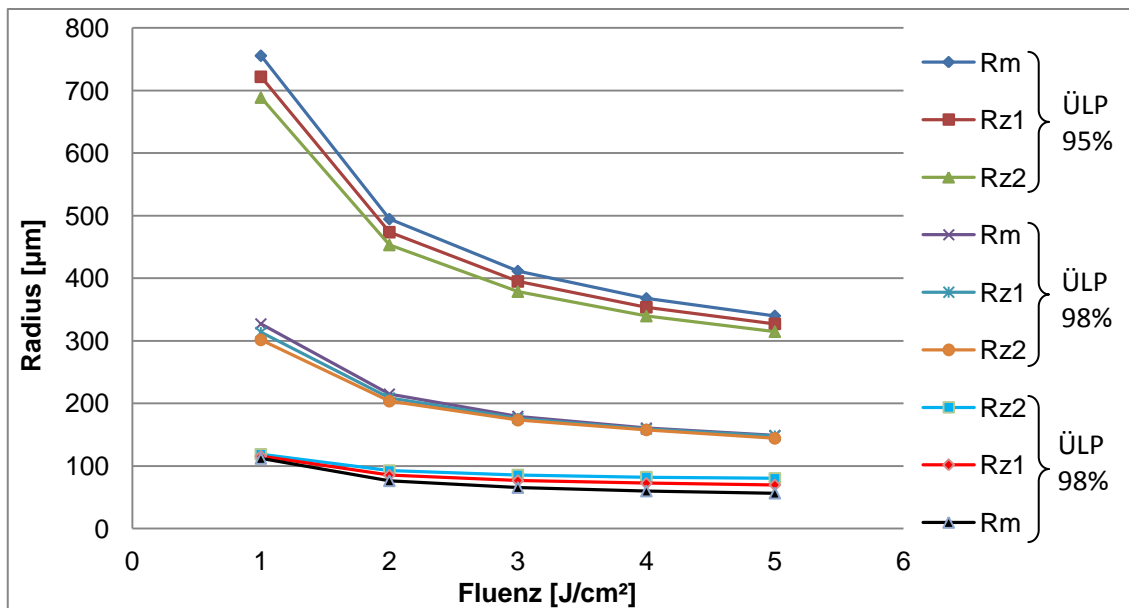


**Abbildung 4-5:** Feldstärkeverteilung (Realteil, nicht normiert) in der Fokusregion der Fresnel-Zylinderlinse

Der vergrößert dargestellte Fokusbereich in Abbildung 4-5 zeigt, dass die Feldstärke besonders in zwei Punkten konzentriert wird, vermutlich durch die Überlagerung der Strahlungsanteile von Mittellinse und 1. Fresnel-Zone bzw. 1. und 2. Fresnel-Zone. Zwischen diesen beiden Punkten ist die Feldstärke ebenfalls stärker konzentriert. Der gesamte Bereich erstreckt sich in z-Richtung über eine Länge von rund 15  $\mu\text{m}$ , der erste Fokus liegt bei  $z = 260 \mu\text{m}$ . Um die Funktion der Maske und die Zuverlässigkeit der Simulation zu überprüfen werden mit der Maske Strukturierungsversuche durchgeführt.

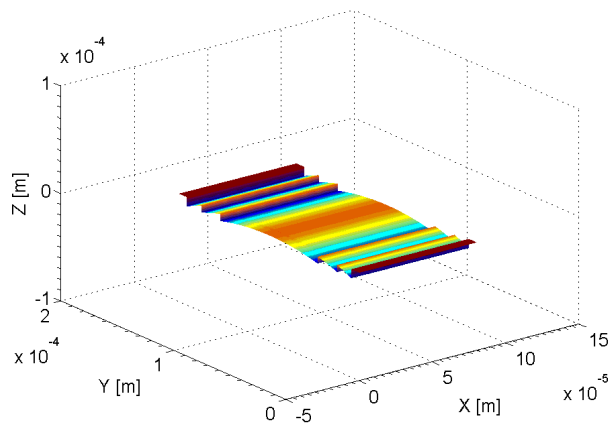
#### 4.1.2 Teilkreisemaske

Bei den Untersuchungen zur Teilkreisemaske wird wie bei der cos-Maske vorgegangen. Durch das Variieren der Abtragsparameter konnten die optimalen Parameter mit  $\ddot{U}LP = 98 \%$  und  $H = 5,49 \text{ J/cm}^2$  ermittelt werden. Die Fluenz entspricht einem Abtrag von 150 nm pro Puls.

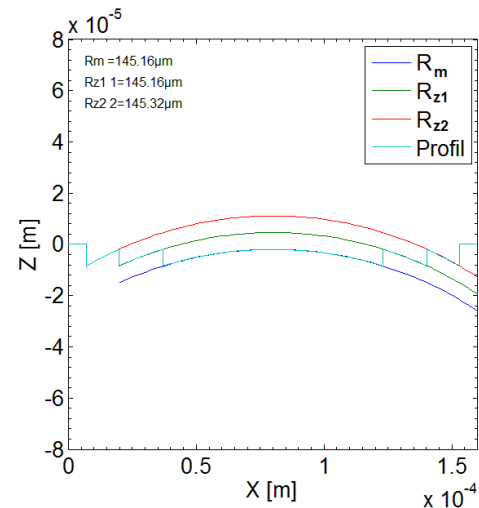


**Abbildung 4-6:** Radien der Mittellinse  $R_m$  und der Fresnel-Zonen  $R_{z1}$  und  $R_{z2}$  für verschiedene Fluenzen und  $\ddot{U}LP$  für eine Teilkreisemaske.

Bei einem homogenen Abtrag über die gesamte Maskenfläche sollte somit die Erzeugung einer Fresnel-Zylinderlinse mit gleichen Zonenradien möglich sein. Aus Abbildung 4-6 ist jedoch erkennbar, dass dies nur bei den entsprechenden Parametern der Fall ist. Für einen kleineren  $\ddot{U}LP$  als 98 % sind die Radien der Fresnel-Zonen generell kleiner als die der Mittellinse. Für einen  $\ddot{U}LP$  größer 98 % dreht sich das Verhältnis um. Es gibt demnach nur einen Satz Parameter für den die Maske funktioniert, d.h. mit denen eine Linse mit dem Krümmungsradius  $R = 145 \mu\text{m}$  erzeugt werden kann.

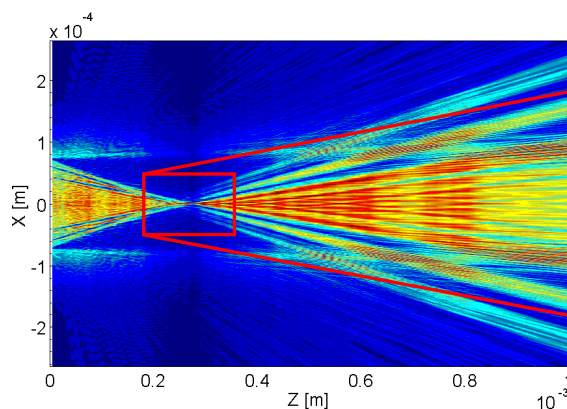


**Abbildung 4-7:** 3D-Darstellung der mit der Teilkreismaske berechneten Oberfläche.

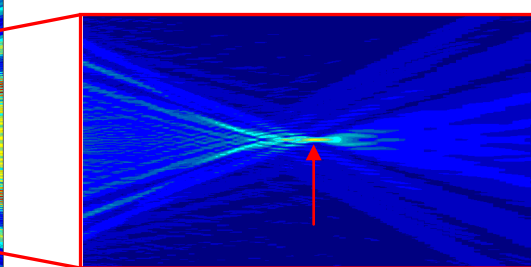


**Abbildung 4-8:** Profilschnitt der berechneten Oberfläche mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion.

Aufgrund dessen, dass alle Zonen den gleichen Radius aufweisen, ist mit einer Verbesserung der Funktion zu rechnen. Dies kann aus Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 entnommen werden. Es ist zu erkennen, dass sich die Feldstärke besonders in einem Punkt  $276 \mu\text{m}$  von der Abstrahlfläche entfernt konzentriert. Bei einem optimalen Strukturierungsergebnis ist in dieser Entfernung bei der Vermessung mit der größten Intensität zu rechnen.



**Abbildung 4-9:** Berechnete Feldstärkeverteilung (Realteil, normiert) für die mit der Teilkreismaske simulierte Fresnel-Zylinderlinse in der xz-Ebene ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $n = 1,5264$ ).



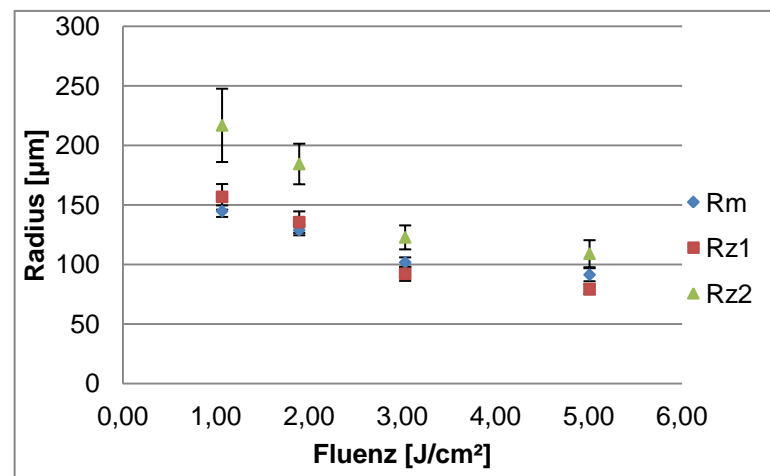
**Abbildung 4-10:** Feldstärkeverteilung (Realteil, nicht normiert) in der Fokusregion der Fresnel-Zylinderlinse.

## 4.2 Ergebnisse der Strukturierungsversuche

Die hergestellten cos-Masken wurden vor der Strukturierung bezüglich der Fläche und der Ausdehnung in Vorschubrichtung vermessen. Die daraus ermittelten Werte dienen der Leistungsmessung und der Berechnung des ÜLP. Die Strukturierung erfolgt ausschließlich bei einem ÜLP von 98 % und einer Pulswiederholfrequenz von  $f_p = 200$  Hz, da versucht werden soll die gewünschte Struktur gezielt und möglichst schnell herzustellen. Im Vordergrund steht die Erzeugung von Linsen mit definierten Krümmungsradien.

### 4.2.1 cos-Maske

Die Strukturierung mit der hergestellten cos-Maske erfolgte mit Fluenzen im Bereich von 1 - 5 J/cm<sup>2</sup>. Des Weiteren wurden Strukturierungsversuche bei der in Kapitel 4.1.1 berechneten optimalen Fluenz durchgeführt. Die Auswertung der Strukturen erfolgte nach der in Kapitel 3.2.4 vorgestellten Methode. Die Radien der erzeugten Strukturen wurden vermessen und sind in Abbildung 4-11 in Abhängigkeit von der Fluenz dargestellt. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Radien mit steigender Fluenz in allen Bereichen abnehmen. Dies entspricht dem von der Simulation vorhergesagten Verhalten. Die Radien der Zonen verhalten sich zueinander jedoch nur teilweise wie vorhergesagt. Ab einer Fluenz von 3,03 J/cm<sup>2</sup> bildet sich der Radius der 1. Fresnel-Zone kleiner aus als der der Mittellinse.



**Abbildung 4-11:** Ermittelte Radien der Mittellinse, der 1. und der 2. Fresnel-Zone der erzeugten Fresnel-Zylinderlinsen (ÜLP = 98 %, H = 1 – 5 J/cm<sup>2</sup>).

Der Vergleich der ermittelten Radien der Strukturen (siehe Abbildung 4-11) mit denen der Simulation (siehe Abbildung 4-1) zeigt außerdem einen quantitativen Unterschied.

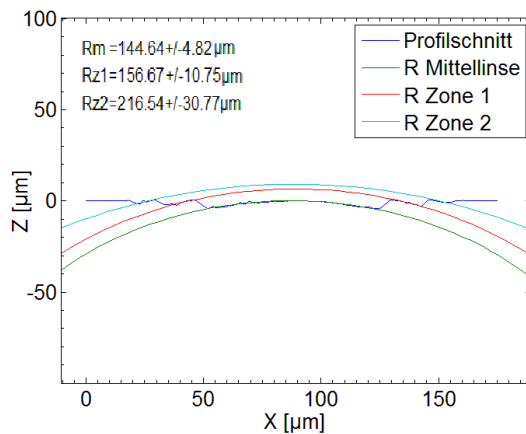


Die Abweichungen der hergestellten Strukturen von den berechneten haben mehrere Ursachen. Bei der Strukturierung mit der eingesetzten Maske treten Probleme auf, die sich deutlich auf das Bearbeitungsergebnis auswirken. In einem ersten Versuch sollten Strukturen mit unterschiedlichen Fluenzen im oben genannten Fluenzbereich hergestellt werden. Dabei wurde die Fluenz schrittweise um  $1 \text{ J/cm}^2$  von 1 auf  $5 \text{ J/cm}^2$  erhöht. Die der Fluenz von  $H = 5 \text{ J/cm}^2$  entsprechende Leistung konnte jedoch nicht erreicht werden. Für die Versuche wurde der Fluenzbereich auf 1 bis  $4 \text{ J/cm}^2$  verkleinert. Vor jeder Strukturierung wurde bei der eingestellten Leistung ein Abtragsfeld mit 20 Pulsen erzeugt, welches im Nachgang bezüglich der Abtragstiefe ausgewertet wurde. Aus der Abtragstiefe jedes einzelnen Feldes konnte die tatsächliche Fluenz ermittelt werden. Der Vergleich von eingestellter und tatsächlicher Fluenz zeigt teilweise einen Unterschied von  $> \pm 1 \text{ J/cm}^2$ .

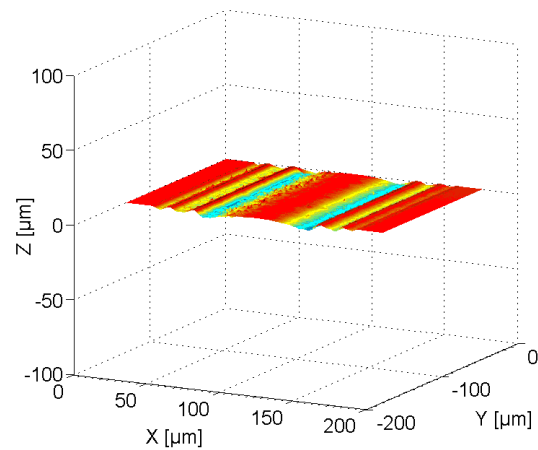
Derartig große Schwankungen machen eine exakte Einstellung der Fluenz im Vorhinein nur schwer möglich. Es muss beachtet werden, dass die Maskenfläche sehr klein ist und somit der sichere Messbereich des Leistungsmessgerätes unterschritten wird. Für eine sichere Messung bzw. Einstellung der Leistung sollte das Messgerät auf mindestens  $10 \text{ }\mu\text{W}$  genau messen können. Des Weiteren ist die Fluenz innerhalb des Maskenbereichs nicht homogen. Die Maske wurde bei ersten Untersuchungen nicht symmetrisch in den Strahl eingebracht, sodass die Fresnel-Zonen auf einer Seite tiefer eingebracht wurden als auf der anderen. Bei der Justage wurde festgestellt, dass die Maske an keiner Position vollständig homogen ausgeleuchtet wird und die Abtragstiefe nach außen hin abnimmt. Bei symmetrischer Ausrichtung wird dadurch die 2. Fresnel-Zone beidseitig nicht mit der entsprechenden Solltiefe eingebracht.

Aufgrund der inhomogenen nach außen hin abnehmenden Intensität wird zwangsläufig immer eine niedrigere Gesamtleistung gemessen. Demnach ist die genaue Einstellung der Fluenz nur dann möglich, wenn die Intensitätsverteilung über die Maskenfläche bekannt ist. Dennoch konnte durch die Variation der Fluenz eine Fresnel-Zylinderlinse erzeugt werden, deren Mittellinse einen Radius von  $R_m = 144,6 \pm 4,8 \text{ }\mu\text{m}$  und deren 1. Fresnel-Zone einen Radius von  $R_{z1} = 156,6 \pm 10,7 \text{ }\mu\text{m}$  aufweist. Die Radien stimmen sehr gut mit den Radien der Simulation überein. In Abbildung 4-12 ist eine Schnittdarstellung der aufgenommenen Oberfläche (siehe Abbildung 4-13) dargestellt. Der Radius der 2. Fresnel-Zone ist mit  $R_{z2} = 216,5 \pm 30,7 \text{ }\mu\text{m}$  deutlich größer als erwartet. Die Krümmungsradien der Mittellinse und der 1. Fresnel-Zone konnten mit wenigen  $\mu\text{m}$  Abweichung von den Sollradien bei einer Fluenz von rund  $1 \text{ J/cm}^2$  erzeugt werden. Die

eingesetzte Fluenz ist deutlich kleiner als die im Vorhinein berechnete. Aufgrund dessen ist zu vermuten, dass der ÜPL nicht korrekt gewählt oder die Maskengeometrie mit unzureichender Genauigkeit auf die Tantalfolie übertragen wurde.

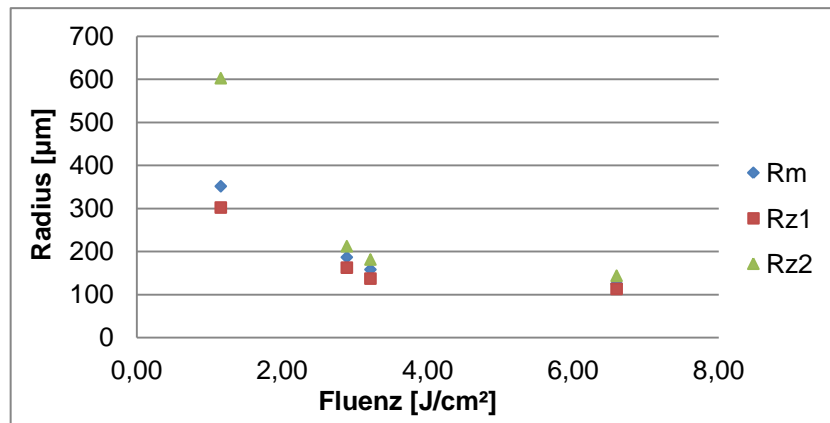


**Abbildung 4-12:** Profilschnitt einer strukturierten Fresnel-Zylinderlinse (ÜLP = 98 %,  $H = 1,07 \text{ J/cm}^2$ ).



**Abbildung 4-13:** 3D-Darstellung der strukturierten Fresnel-Zylinderlinse.

Bei der Suche nach der Ursache konnte festgestellt werden, dass beide Faktoren einen Einfluss haben. Die Maske wurde nach ihrer Herstellung vermessen, um die Maskenfläche und die Ausdehnung in Vorschubrichtung zu ermitteln. Der ÜLP bezieht sich auf diesen gemessenen Wert. Wird dieser nicht exakt ermittelt oder kann nur mit unzureichender Genauigkeit gemessen werden, ergibt sich eine Differenz zwischen der in der Simulation verwendeten PPD und der sich bei der Strukturierung ergebenden PPD. Im Nachgang wurde ermittelt, dass sich die PPD und somit der ÜLP von Strukturierung und Simulation deutlich unterscheiden. Die Parameter der Strukturierung wurden angepasst und erneut Versuche durchgeführt. Die erzeugten Strukturen weisen in dem untersuchten Fluenzbereich Krümmungsradien im Bereich von 100 - 300  $\mu\text{m}$  auf, was der Simulation entspricht. Es ist jedoch zu erkennen, dass der Radius der Mittellinse generell zwischen dem der 1. und der 2. Zone liegt (siehe Abbildung 4-14).



**Abbildung 4-14:** Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der erzeugten Fresnel-Zylinderlinsen mit angepassten Parametern.

Dieses Verhalten kann nur durch eine unzureichend genaue Fertigung der Maske erklärt werden. In diesem Zusammenhang ist jedoch nicht das Fertigungsverfahren an sich als unzulänglich anzusehen. Von entscheidender Bedeutung ist das Verhältnis von Maskengröße zu den tolerierbaren Abweichungen von der Sollkontur. Die berechnete Maske ist in ihrer Ausdehnung in Vorschubrichtung sehr klein gewählt, in der Maskenebene beträgt diese rund 0,2 mm. Unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes ergibt sich für die Abbildung der Maske eine Ausdehnung von 7,5  $\mu\text{m}$ , was bei einem  $\ddot{U}\text{LP}$  von 98 % zu einer PPD von 150 nm führt. Eine Abweichung der Maskeengeometrie in der Maskenebene von 4  $\mu\text{m}$  bewirkt in der Abbildungsebene eine Abweichung in der Größenordnung der PPD und somit eine Abweichung in der Anzahl an Pulsen pro Flächenelement. Das bedeutet, dass bereits kleinste Abweichungen der Maskeengeometrie von der Idealform zu einer großen Abweichung der Geometrie der Zielstruktur führen können.

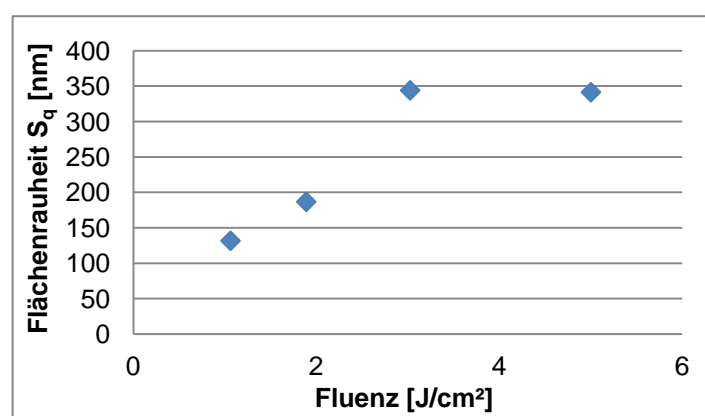
Durch eine Streckung der Maske in Vorschubrichtung kann der Einfluss dieser Abweichungen reduziert werden. Des Weiteren wurden die Linsen bezüglich der Breite der Zonenübergänge untersucht, da diese einen Einfluss auf die Funktion der Linsen haben. Das Konfokalmikroskop kann nur Strukturelemente erfassen, deren Winkel zur Oberfläche kleiner ist als 45°. Die Flanken der Struktur an den Zonenübergängen weisen einen größeren Winkel auf und werden somit nicht erfasst. Für die Darstellung werden die fehlenden Werte zwischen den Messwerten interpoliert, demnach erscheinen die Profilschnitte als kontinuierlich. Über den tatsächlichen Verlauf zwischen den Zonen kann keine Aussage getroffen werden. Es ist davon auszugehen, dass die Zonenübergänge keinen Beitrag zu optischen Funktion liefern. Breite Zonenübergänge verkleinern die optisch aktive Oberfläche der Linsen und verringern somit die Effizienz

der Linsen. Es ist demnach von großem Interesse die Breite der Zonenübergänge zu minimieren. Als Zonenübergang wird der Bereich zwischen dem Minimum einer Zone und dem Maximum der darauf folgenden Zone angesehen. Die Breite der Zonenübergänge kann ebenfalls aus den aufgenommenen Oberflächenprofilen durch die Berechnung der Abstände lokaler Extrempunkte ermittelt werden. In Tabelle 4-1 sind die ermittelten Breiten der Zonenübergänge von der Mittellinse zur 1. Zone (Übergang 1) und von der 1. zur 2. Zone (Übergang 2) aufgelistet.

**Tabelle 4-1:** Breiten der Zonenübergänge der hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz.

Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Übergang 1 Breite [μm]	Standardabweichung	Übergang 2 Breite [μm]	Standardabweichung
1,07	6,78	0,438	6,08	0,606
1,89	6,02	0,475	5,32	0,35
3,03	5,9	0,73	5,18	0,356
5,01	6,02	0,66	5,96	0,53

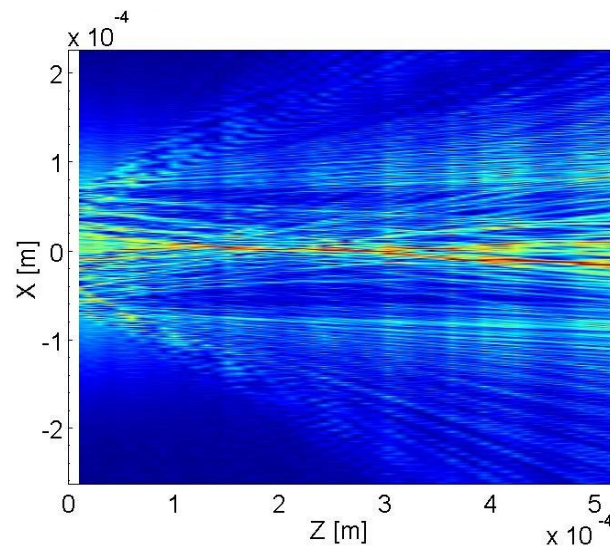
Diese liegen in einem Bereich von 5 - 6 μm. Es ist keine eindeutige Abhängigkeit der Breite der Übergänge von der Fluenz erkennbar. Einen weiteren Einfluss auf die optische Funktion hat die Oberflächenrauheit der Linsen. In Abbildung 4-15 sind die ermittelten Flächenrauheiten in Abhängigkeit von der Fluenz dargestellt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die Rauheit der Linsenoberfläche mit zunehmender Fluenz steigt.



**Abbildung 4-15:** Flächenrauheit der mit der cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen.

Die Rauheit liegt in einem Bereich von  $> \lambda/10$  der Design-Wellenlänge, für die Wellenlänge des frequenzverdoppelten Nd:YAG-Lasers in einem Bereich von  $> \lambda/5$  bis  $> \lambda/2$ . Dadurch wird die Funktion der Linsen stark beeinflusst, da die Strahlung an der Ober-

fläche gestreut wird. In Abbildung 4-16 ist die berechnete Feldstärkeverteilung für einen Profilschnitt der mit  $1 \text{ J/cm}^2$  hergestellten Linse dargestellt.



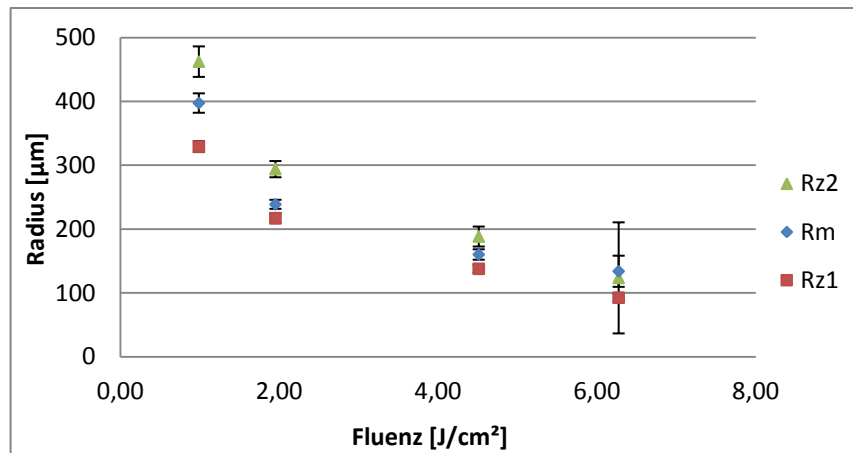
**Abbildung 4-16:** Berechnete relative Feldstärkeverteilung für einen Profilschnitt der hergestellten Oberfläche ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $n = 1,5264$ ,  $\text{ÜLP} = 98 \%$ ,  $H = 1,07 \text{ J/cm}$ ).

Es ist deutlich zu erkennen, dass ein großer Anteil der Strahlung gestreut und nicht wie beabsichtigt fokussiert wird. Für eine Verbesserung der Funktion der Linsen muss eine bessere Formgenauigkeit und Oberflächengüte erreicht werden. Dies kann unter anderem durch die Anpassung der Maskengeometrie erfolgen.

### 4.2.2 Teilkreismaske

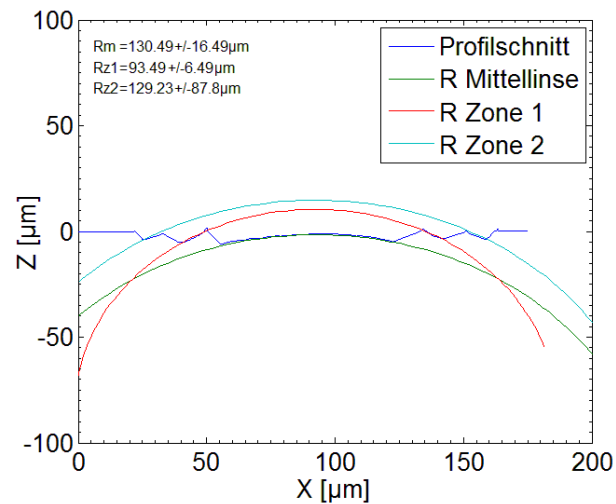
Die berechnete Teilkreismaske ist, wie auch die cos-Maske, für einen ÜLP von 98 % ausgelegt. Alle Versuche wurden bei diesem ÜLP durchgeführt, welcher anhand der gemessenen Maskenausdehnung gewählt wurde. Bei den Versuchen wurde der gleiche Fluenzbereich wie bei der cos-Maske untersucht. Die angestrebten  $5,49 \text{ J/cm}^2$  konnten nicht eingestellt werden, da die berechnete Laserleistung auch bei maximaler Transmission des Abschwächers nicht erreicht wurde. Die erzeugten Strukturen wurden vermessen und mit dem entwickelten Programm bezüglich der Radian ausgewertet. Für die hergestellten Strukturen ergaben sich bei fast allen Strukturierungsversuchen deutliche Abweichungen von Soll- und Ist-Fluenz, was auf die in Kapitel 4.2.1 angegebenen Gründe zurückzuführen ist. Diese Abweichungen führen zwangsläufig zu einem anderen Bearbeitungsergebnis als erwartet. Aus Abbildung 4-17 ist deutlich zu erkennen, dass die Radian der Mittellinse und der Fresnel-Zonen bei keinen der Para-

meter übereinstimmen. Des Weiteren zeigt die Maske ein Verhalten, wie es so nicht von der Simulation vorhergesagt wurde.



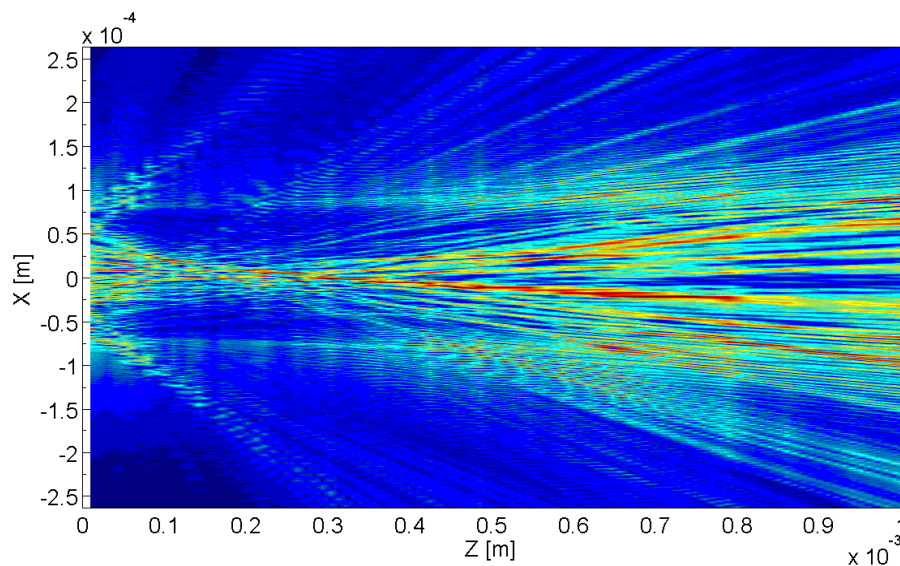
**Abbildung 4-17:** Radien der mit der Teilkreismaske erzeugten Fresnel-Linsen in Abhängigkeit der ermittelten Fluenz.

Die ermittelten Radien liegen zwar im Bereich der simulierten und werden mit zunehmender Fluenz kleiner, dennoch widersprechen deren Verhältnisse zueinander allen Erwartungen. Aus Abbildung 4-6 geht hervor, dass sich die Radien der Mittellinse und der Zonen mit der Annäherung an die optimalen Parameter ebenfalls einander annähern. Des Weiteren sind die simulierten Radien der Zonen in dem angegebenen Parameterbereich generell kleiner als die der Mittellinse, was für die strukturierten Linsen nur auf Zone 1 zutrifft. Oberhalb einer Fluenz von  $H = 5,49 \text{ J}/\text{cm}^2$  sollte sich das Verhältnis umdrehen, sodass die Radien der Zonen im Allgemeinen größer sind als der Radius der Mittellinse. Aus Abbildung 4-17 ist erkennbar, dass sich die Maske auch diesbezüglich anders verhält als erwartet. Die Abweichungen können, neben dem inhomogenen Abtrag wie bei der cos-Maske durch Abweichungen der Maskengeometrie erklärt werden. Der Radius von Zone 2 ist im Allgemeinen größer als der der Mittellinse und der Zone 1, d.h. durch den geringeren Abtrag im Randbereich der Abbildung entsteht eine nur sehr leicht gekrümmte Oberfläche, mit großem Krümmungsradius. Das beste Ergebnis wurde mit der ermittelten Fluenz von  $H = 6,27 \text{ J}/\text{cm}^2$  erreicht. Die Mittellinse und die Zone 2 weisen im Mittel einen annähernd gleichen Radius von rund  $130 \mu\text{m}$  auf. Der Radius von Zone 1 weicht hingegen mit rund  $93,5 \mu\text{m}$  deutlich von den anderen ab (siehe Abbildung 4-18).



**Abbildung 4-18:** Profilschnitt einer mit der Teilkreismaske hergestellte Zylinderlinse ( $\text{ÜLP} = 98\%$ ,  $H = 6,27 \text{ J/cm}^2$ ).

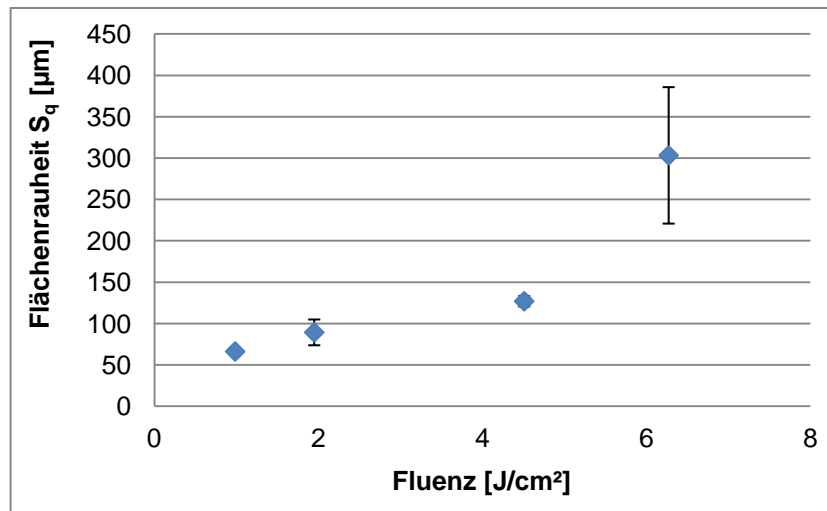
Mit dem in Abbildung 4-18 dargestellten Profilschnitt wurde die optische Wirkung für eine Wellenlänge von  $\lambda = 532 \text{ nm}$  simuliert. Das Resultat ist die in Abbildung 4-19 dargestellte Feldstärkeverteilung in Ausbreitungsrichtung.



**Abbildung 4-19:** Berechnete Feldstärkeverteilung für die mittels Teilkreismaske hergestellte Zylinderlinse ( $\text{ÜLP} = 98\%$ ,  $H = 6,27 \text{ J/cm}^2$ ,  $n = 1,5264$ ,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ).

Aufgrund der Abweichungen der Radien vom Sollradius und der Radien untereinander bildet sich kein eindeutiger Fokus heraus. Es ist lediglich eine Konzentration der Strahlung in einem Bereich von 150 bis 300  $\mu\text{m}$  zu beobachten. Des Weiteren hat die Rauheit der Oberfläche einen großen Einfluss auf die Funktion des optischen Elementes.

Für die hergestellte Linse wurde eine Flächenrauheit von  $S_q = 303 \pm 83$  nm ermittelt, welche in der Größenordnung der halben Wellenlänge liegt.



**Abbildung 4-20:** Ermittelte Flächenrauheiten der mit der Teilkreismaske hergestellten Linsen.

Im Allgemeinen liegen die Werte für die Rauheit der Linsen unter den Werten der mit der cos-Maske hergestellten Linsen. Die Abweichungen der Rauheitswerte kann mit dem unterschiedlich großen Scheitelabstand der Masken erklärt werden. Für beide Masken wurde der gleiche Scheitelabstand festgelegt. Die erkennbaren Unterschiede beim Vergleich der Mikroskopaufnahmen der Masken (Abbildung 3-26 und Abbildung 3-27) sind fertigungsbedingt. Für die cos-Maske ergibt sich ein ungünstiges Verhältnis von Scheitelabstand und PPD, sodass eine raue Oberfläche entsteht.

Es zeigt sich, dass eine kleine Maskenausdehnung in Vorschubrichtung generell ungünstig ist. Einerseits für die Prozesssteuerung und Erzeugung von Fresnel-Linsen mit definierten Radien und andererseits bezüglich der erzeugbaren Oberflächenrauheit. Eine kleine Maskenausdehnung bedeutet, dass bei großem ÜLP die PPD sehr klein wird. Dies führt dazu, dass neben anderen negativen Effekten Schwankungen der Laserleistung bzw. der Fluenz von Puls zu Puls auf einen räumlich betrachtet sehr kleinen Bereich in der Struktur abgebildet werden. Diese Unregelmäßigkeiten werden aufgrund der kleinen PPD in Vorschubrichtung komprimiert auf die Oberfläche übertragen. Durch diese Art Kompression können sehr große Rauheiten entstehen. Eine Streckung der Maske könnte diese Unregelmäßigkeiten dekomprimieren und in Richtung der Wellenlänge verschieben. Die Schwankungen der Fluenz könnte dadurch auf eine größere Fläche verteilt werden, was zu einer Senkung der Rauheit führen würde. Des Weiteren



entstehen in Richtung des Vorschubs sehr steile Strukturflanken. Sollte die Absorption der Strahlung vom Einfallswinkel abhängen, könnte dies ebenfalls einen Einfluss auf die Rauheit der Strukturen haben. Besonders dann, wenn der Winkel groß und die Strukturflanke selbst rau ist. Durch die Streckung der Maske kann der Winkel der Flanke deutlich verringert werden, da sich ein größeres Verhältnis von PPD zum Abtrag pro Puls ergibt. Durch einen kleineren Winkel könnten bessere Bearbeitungsbedingungen für einen stabilen Prozess und zur Senkung der Oberflächenrauheit geschaffen werden.

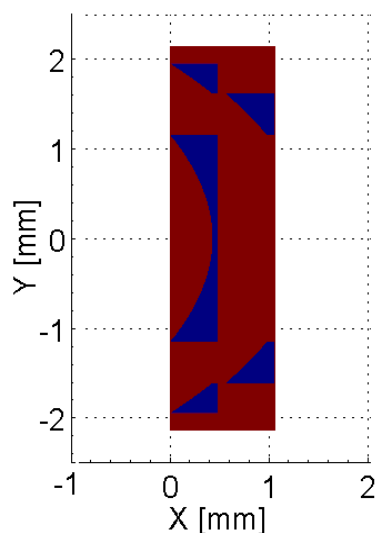
### **4.3 Anpassung der Maskengeometrie**

Mit den berechneten Masken ist die Herstellung von Fresnel-Zylinderlinsen mit gleichen Zonenradien nicht möglich. Des Weiteren ist die Erzeugung definierter Radien nur schwer realisierbar. Dies liegt einerseits an den berechneten Maskengeometrien, andererseits am Strahlprofil des Laserstrahls. Die Herstellung definierter Radien setzt außerdem eine genaue Einstellung der Bearbeitungsparameter voraus.

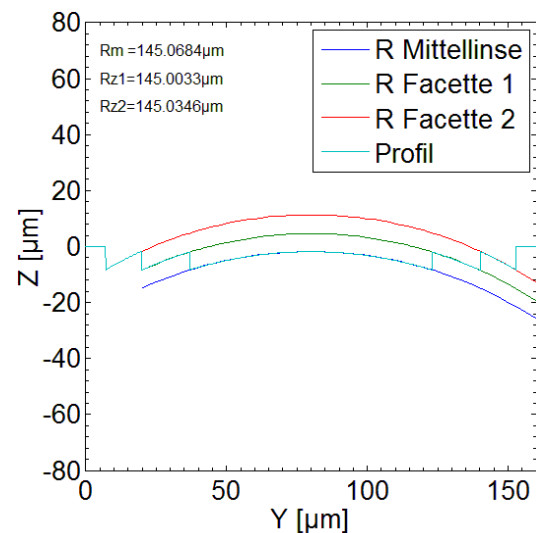
#### **4.3.1 Berechnungen zur Korrektur**

Aufgrund der kleinen Maskenfläche und -ausdehnung in Vorschubrichtung ergeben sich zwei wesentliche Nachteile, die den gesamten Prozess schwer kontrollierbar machen. Die Einstellung der Fluenz erfolgt durch die Messung der Leistung in der Bearbeitungskammer unter Berücksichtigung der Pulswiederholfrequenz und der Maskenfläche. Aufgrund der kleinen Maskenfläche wird jedoch der sichere Messbereich des Leistungsmessgerätes unterschritten, sodass keine genaue Einstellung der Leistung und somit der Fluenz erfolgen kann. Des Weiteren erweist sich eine geringe Maskenausdehnung in Vorschubrichtung als nachteilig, da sich minimale Abweichungen der Maskengeometrie stark auf das Strukturierungsergebnis auswirken können. Um den Prozess besser steuerbar zu machen wird die Maskengeometrie um den Faktor 2 in Vorschubrichtung gestreckt. Dies bedingt eine Verdopplung der PPD. Durch die Verdopplung der Maskenausdehnung wird die Fläche der Maske vergrößert. Das bedeutet, dass wesentlich mehr Leistung in der Bearbeitungskammer zur Einstellung der Fluenz zu Verfügung steht und somit der Messwert evtl. in einen sichereren Messbereich verschoben wird. Des Weiteren wirken sich Abweichungen der Maskengeometrie weniger stark auf das Strukturierungsergebnis aus.

Für beide Masken kann beobachtet werden, dass der Radius der 2. Fresnel-Zone im Allgemeinen größer ist als der der Mittellinse und der der 1. Fresnel-Zone. Dies ist zwar aus den Simulationen teilweise erkennbar, die berechneten und gemessenen Zonenradien stimmen jedoch auch bei gleichem Radius der Mittellinsen nicht überein, was unter Anderem am inhomogenen Abtrag liegt. Die cos-Maske, für die die Abweichung der Radien bereits vorausgesagt wurde, wird so angepasst, dass alle Zonen in der Simulation den gleichen Radius aufweisen. Die Anpassung der Masken erfolgt durch die Streckung der Maskenelemente für Zone 1 und 2 mittels der Faktoren  $f_1 = 1,035$  und  $f_2 = 1,145$ . Zusätzlich werden alle Maskenbereiche um den Faktor 2 gestreckt. Das Ergebnis ist eine angepasste cos-Maske (siehe Abbildung 4-21), die bei homogenem Abtrag über die gesamte Maskenfläche für alle Zonen einen Radius von  $R = 145 \mu\text{m}$  liefern sollte (siehe Abbildung 4-22). Die optimalen Parameter für die Fluenz und ÜLP betragen  $H = 3,15 \text{ J/cm}^2$  und  $\text{ÜLP} = 98 \%$ .



**Abbildung 4-21:** Darstellung der Maskenmatrix der angepassten und gestreckten cos-Maske.



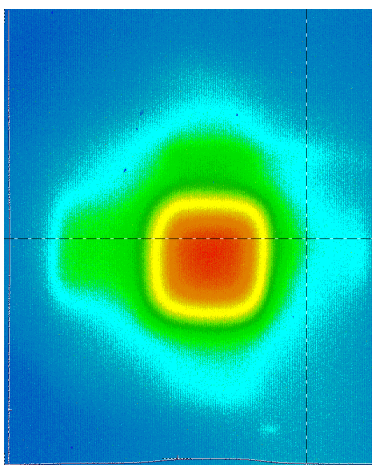
**Abbildung 4-22:** Darstellung des berechneten Profilschnitts mit eingezeichneten Radien der Fit-Funktion.

Bei der Teilkreismaske sind bei optimalen Parametern alle Radien gleich, sodass ausschließlich ein inhomogener Abtrag zur Änderung der Radien führen kann. Im Folgenden wird die Berechnung der Maskengeometrie unter Berücksichtigung dessen durchgeführt. Aus Abbildung 4-23 ist erkennbar, dass das Strahlprofil ein sogenanntes Flat-Top-Profil ist bzw. diesem sehr nahe kommt. Aufgrund der Änderungen im Strahlengang und der damit verbundenen Verkleinerung des homogenen Bereichs ist anzunehmen, dass die äußeren Maskenbereiche nah an der Kante des Strahlprofils liegen und die Fluenz in diesen Bereichen stark abnimmt. Dies kann mit einem Polynom höherer Ordnung gut angenähert werden. Ausgehend von dem besten Strukturierungser-

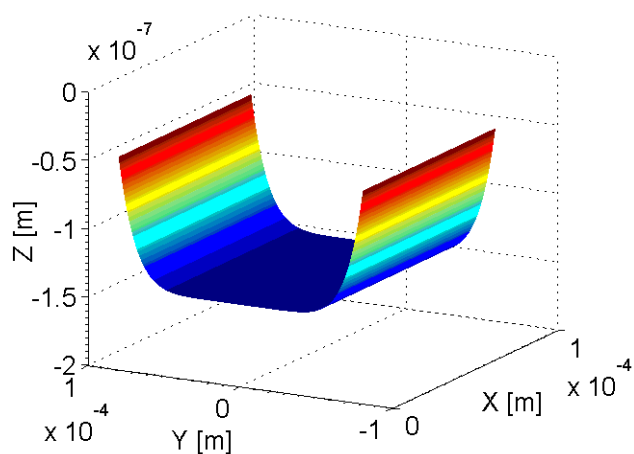
gebnis, welches mit der cos-Maske erzielt wurde, erfolgte die Simulation mit dem entsprechenden Programm unter Berücksichtigung der Bearbeitungsparameter. Das Simulationsergebnis wurde mit dem der strukturierten Linse so abgeglichen, dass die Radien der Mittellinsen mit  $R_m = 145 \mu\text{m}$  übereinstimmen. Der inhomogene Abtrag entlang der Y-Achse kann durch ein Polynom der Form

$$f(x) = 1 - (a_1x^2 + a_2x^4 + a_3x^6 + a_4x^8) \quad (4-1)$$

dargestellt werden. Die Koeffizienten  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  und  $a_4$  bestimmen den Anteil des Beitrages der jeweiligen Potenz von der Koordinate  $x$ . Für die Maskenberechnung wird die Funktion in der Form  $f(y)$  bzw.  $f(j)$  aufgetragen. Es werden aus Symmetriegründen nur gerade Exponenten verwendet. Für die Strukturierung der Zylinderlinsen ist der Abtragsverlauf nur quer zur Vorschubrichtung von Interesse, da die Masken in Vorschubrichtung nicht bis in den Randbereiche des Strahlprofils ausgedehnt sind und der Abtragverlauf in dieser Richtung als homogen angesehen wird. Die Annahme gilt auch für den mittleren Bereich des Laserstrahls, somit ergeben sich die Koeffizienten  $a_1$  und  $a_2$  zu 0. Mit Hilfe des Polynoms kann jedem Element der Maskenmatrix ein ortsabhängiger Abtragswert zugewiesen werden (siehe Abbildung 4-24). Ausgehend vom vorherigen Abgleich von Simulation und Strukturierung wurden die Koeffizienten  $a_3$  und  $a_4$  angepasst, sodass die Radien um  $\pm 1 \mu\text{m}$  übereinstimmen. Die Werte für die Koeffizienten wurden mit  $a_3 = 15 \cdot 10^{-21}$  und  $a_4 = 1 \cdot 10^{-26}$  ermittelt, als Koordinate wird der Index  $j$  verwendet.

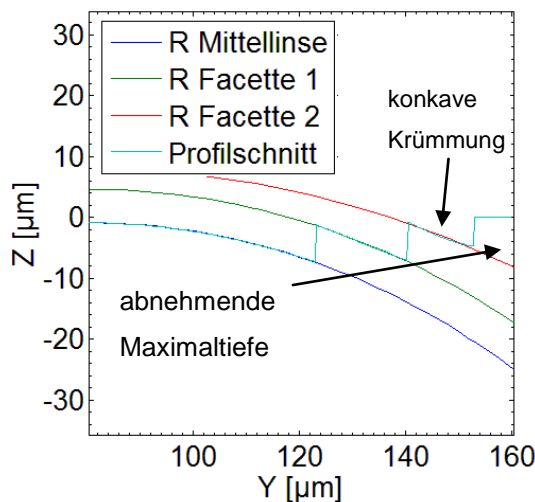


**Abbildung 4-23:** Aufnahme des Strahlprofils des Fluorlaserstrahls nach Anpassung des Strahlengangs.

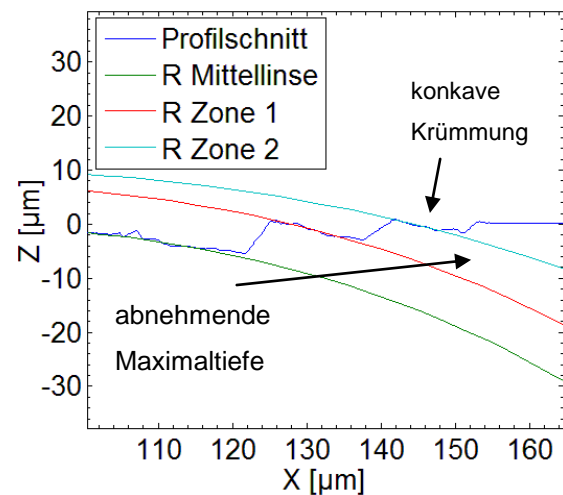


**Abbildung 4-24:** Berechnetes Polynom 6. Ordnung zur Beschreibung des inhomogenen Abtrags.

Die Simulation des Strukturierungsprozesses, welche unter Berücksichtigung der Abtragsfunktion durchgeführt wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den realen Strukturierungsergebnissen. Dabei fallen zwei Sachverhalte besonders deutlich auf. Der inhomogene Abtrag führt einerseits zu einer abnehmenden Tiefe der Strukturen zum Rand hin, d.h. die Zonen werden nicht mit der entsprechenden Solltiefe eingebracht. Des Weiteren bildet sich der Radius in entgegengesetzter Richtung aus, d.h. die Oberfläche wird nicht konvex, sondern konkav gekrümmt. Dies kann sowohl anhand der simulierten als auch der strukturierten Fresnel-Zylinderlinsen gezeigt werden (Vgl. Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26). Die Krümmung ist nur sehr leicht ausgeprägt aber dennoch vorhanden. Es ist davon auszugehen, dass dadurch die Funktion der Linse negativ beeinflusst wird.

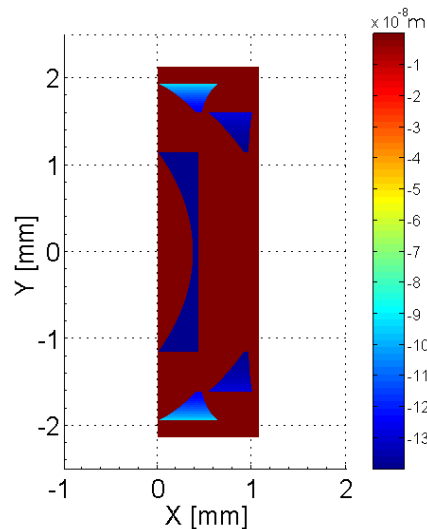


**Abbildung 4-25:** Profilschnitt einer simulierten Fresnel-Zylinderlinse mit inhomogenen Abtrag.

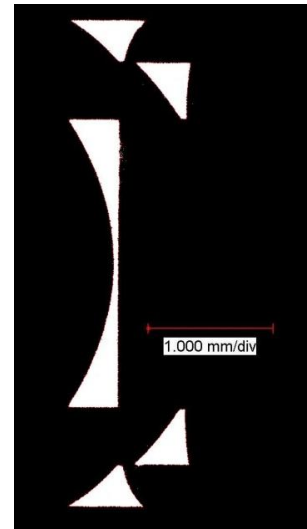


**Abbildung 4-26:** Profilschnitt einer strukturierten Fresnel-Zylinderlinse.

Für die Herstellung der korrekten Geometrie ist demnach eine Anpassung der Maske erforderlich. Diese erfolgt unter der Einbeziehung des ermittelten Polynoms in Form eines ortsabhängigen Streckungsfaktors  $f_j$ . Als Versuchsmaske wird aufgrund der einfacheren Implementierung eine Teilkreisemaske gewählt, welche zusätzlich um den Faktor 2 gestreckt wird.



**Abbildung 4-27:** Darstellung der Maskenmatrix der korrigierten Teilkreismaske mit inhomogenem Abtrag über die Maskenfläche.

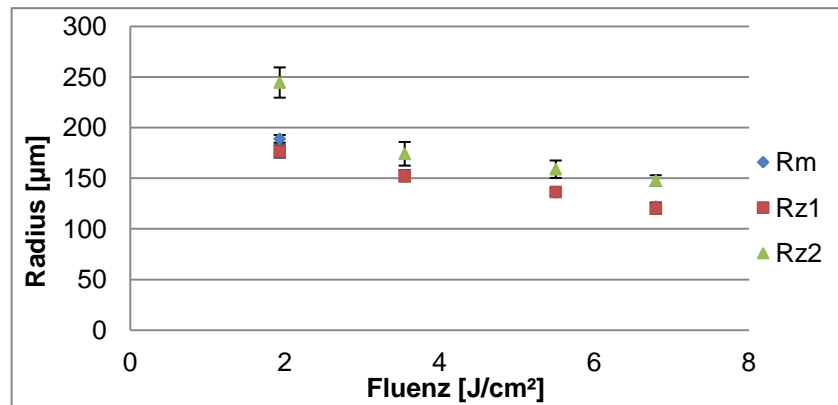


**Abbildung 4-28:** Mikroskopaufnahme der hergestellten korrigierten Teilkreismaske.

Die berechnete Maskenmatrix und eine Mikroskopaufnahme der hergestellten Maske sind in Abbildung 4-27 bzw. in Abbildung 4-28 dargestellt. Aus Abbildung 4-27 ist erkennbar, dass mit abnehmender Abtragstiefe die Maskenausdehnung zunimmt, dadurch soll eine Kompensation der nach außen hin abnehmenden Abtragtiefe erfolgen.

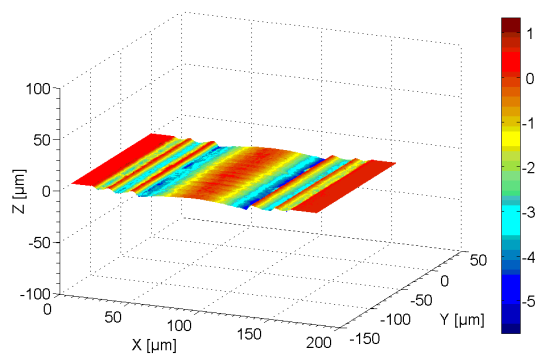
### 4.3.2 Strukturierung mit angepassten Masken

Die Strukturierung mit der korrigierten cos-Maske zeigt ein deutlich besseres Verhalten als deren erste Ausführung. Die Krümmungsradien der einzelnen Zonen der erzeugten Fresnel-Zylinderlinsen liegen im Bereich der simulierten, stimmen jedoch nicht exakt mit diesen überein. Die relativ geringen Abweichungen können aus der Fluenzberechnung resultieren. Für jede erzeugte Linse wurde die Fluenz aus dem gemittelten Wert der Tiefe des Einzelabtrags ermittelt. Die gemessene Tiefe innerhalb eines Einzelabtrags unterliegt Schwankungen aufgrund des inhomogenen Abtrags. Die Mittelung der gemessenen Abtragstiefen führt zu einer geringeren mittleren Abtragstiefe und somit zu einer geringeren Fluenz. Aus Abbildung 4-29 ist erkennbar, dass durch die Korrektur der Maske die Radien der Mittellinse und der 1. Fresnel-Zone bei nahezu allen Parametern übereinstimmen. Der Radius der 2. Fresnel-Zone ist bei allen erzeugten Linsen größer.

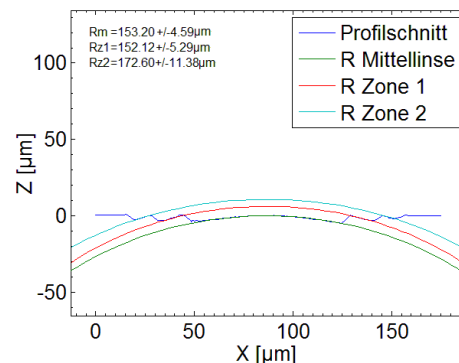


**Abbildung 4-29:** Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der mit der korrigierten cos-Maske hergestellten Fresnel-Linsen in Abhängigkeit von der Fluenz (ÜLP = 98 %).

Dies war aufgrund des inhomogenen Abtrags nicht anders zu erwarten. Im Allgemeinen stimmt das Verhalten der Maske bezüglich der erzeugbaren Krümmungsradien gut mit der Simulation überein. Durch die Vergrößerung der Maskenfläche kann in der Bearbeitungskammer eine deutlich größere Leistung gemessen werden. Durch die inhomogene Intensitätsverteilung wird jedoch auch bei einer größeren Maskenfläche nur eine mittlere Leistung gemessen. Für eine exakte Einstellung der Fluenz über die Leistung ist die genaue Kenntnis der Intensitätsverteilung über die Maskenfläche notwendig. Alternativ ist für jede Maske die Berechnung eines Korrekturfaktors notwendig. Durch die Variation der Fluenz konnte eine Fresnel-Zylinderlinse erzeugt werden, deren Mittellinse einen Krümmungsradius von  $R_m = 153,2 \pm 5,59 \mu\text{m}$  und 1. Fresnel-Zone einen Radius von  $R_{z1} = 152,12 \pm 5,29 \mu\text{m}$  aufweist. Diese liegen nahe an denen der Zielstruktur. In Abbildung 4-30 ist eine Konfokalmikroskop-Aufnahme und in Abbildung 4-31 ein Profilschnitt der erzeugten Linse dargestellt.

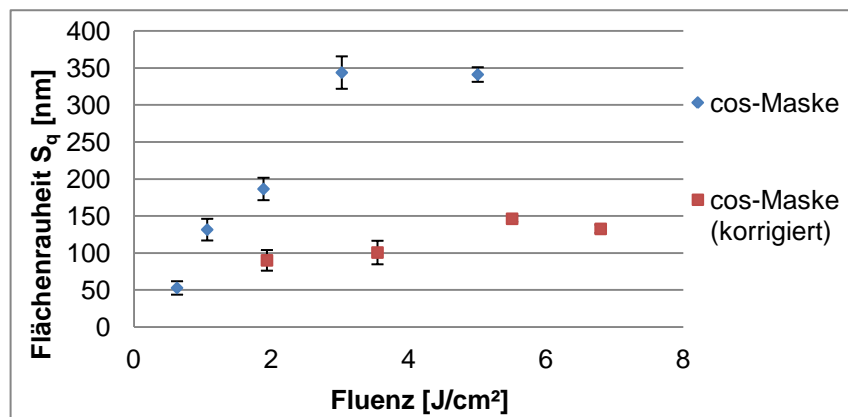


**Abbildung 4-30:** 3D-Darstellung der Konfokalmikroskop-Aufnahme der mit  $H = 3,55 \text{ J/cm}^2$  und ÜLP = 98 % erzeugten Fresnel-Zylinderlinse.



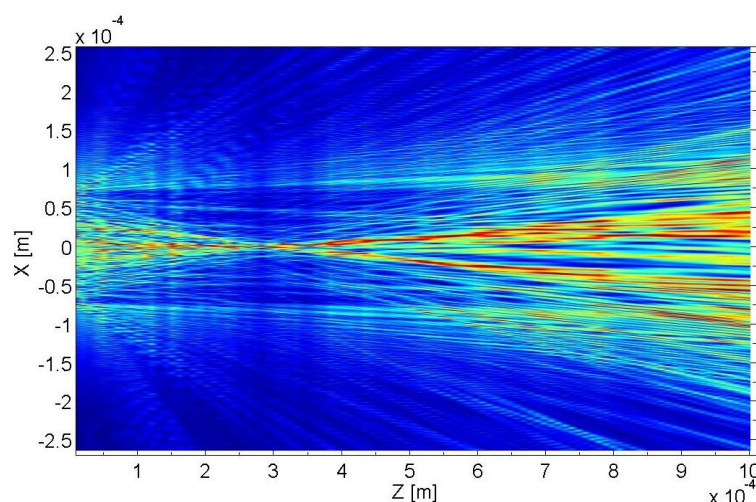
**Abbildung 4-31:** Profilschnitt der mit  $H = 3,55 \text{ J/cm}^2$  und ÜLP = 98 % erzeugten Fresnel-Zylinderlinse.

Des Weiteren wurde die Flächenrauheit der hergestellten Linsen vermessen. Der Vergleich der Rauheiten der mit der korrigierten und der nicht korrigierten cos-Maske hergestellten Linsen zeigt, dass mit der korrigierten Maske deutlich kleinere Rauheiten erreicht werden (siehe Abbildung 4-32).



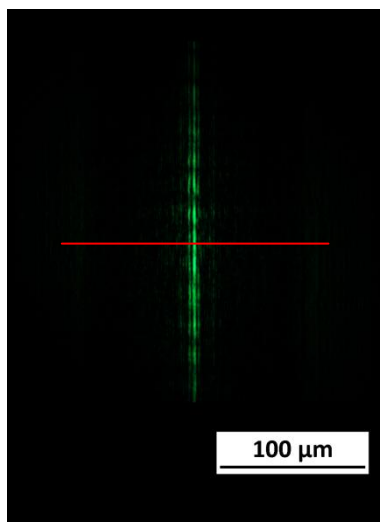
**Abbildung 4-32:** Gemessene Flächenrauheiten  $S_q$  für die mit der korrigierten und nicht korrigierten cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz.

Für die oben dargestellte Linse wurde eine Flächerauheit von  $S_q = 100 \pm 15,9$  nm erreicht. Aufgrund der übereinstimmenden Radien der Mittellinse und der 1. Fresnel-Zone ist mit einer deutlich besseren optischen Funktion der Linsen zu rechnen. Mit dem in Abbildung 4-31 dargestellten Profilschnitt wurde die optische Wirkung der Linse für eine Wellenlänge von  $\lambda = 532$  nm berechnet. In Abbildung 4-33 ist die berechnete relative Feldstärke dargestellt.

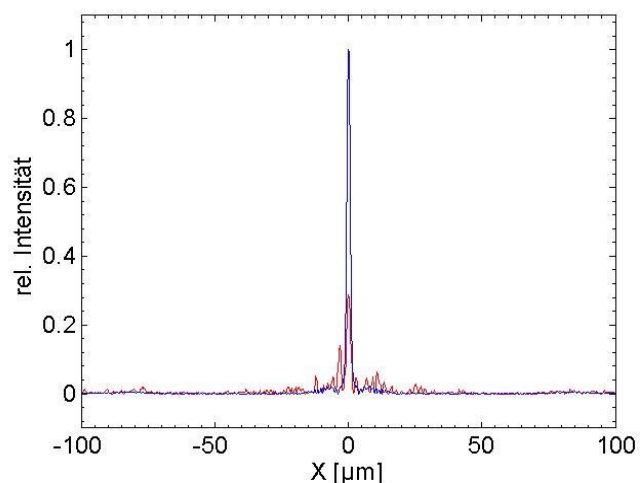


**Abbildung 4-33:** Berechnete normierte Feldstärkeverteilung der mit  $H = 3,55$  J/cm² und  $\text{ÜLP} = 98\%$  erzeugten Fresnel-Zylinderlinse.

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Strahlung deutlich besser fokussiert wird. Es tragen jedoch, wie erwartet, nicht alle Bereiche der Linse zur Fokussierung bei. Des Weiteren ist zu erkennen, dass ein großer Teil der Strahlung aufgrund der Rauheit der Oberfläche gestreut wird. Die berechnete Brennweite der hergestellten Linse liegt bei  $282\text{ }\mu\text{m}$ . Eine Vermessung der optischen Wirkung mit dem in Kapitel 3.2.5 beschriebenen Aufbau ergab eine Brennweite von  $273\text{ }\mu\text{m}$ . Es ist zu beachten, dass die Berechnung der optischen Wirkung für einen Profilschnitt durchgeführt wurde und somit nicht zwangsläufig die gesamte Linse repräsentiert. Weicht der Profilschnitt stark vom mittleren Profil der Linse ab, können u.U. starke Abweichungen in der Intensitätsverteilung auftreten. In Abbildung 4-34 ist eine Konfokalmikroskopaufnahme aus der Fokusebene der Linse dargestellt. Aus der Abbildung wurde ein Grauwertbild berechnet. Die Verteilung der Grauwerte wird als Maß für die Intensität der Strahlung in den betrachteten Bereichen herangezogen. In Abbildung 4-35 ist die Intensitätsverteilung des in Abbildung 4-34 gekennzeichneten Schnittes (rote Linie) dargestellt.



**Abbildung 4-34:** Konfokalmikroskop-Aufnahme der Fokusebene  $273\text{ }\mu\text{m}$  über der Substratoberfläche.



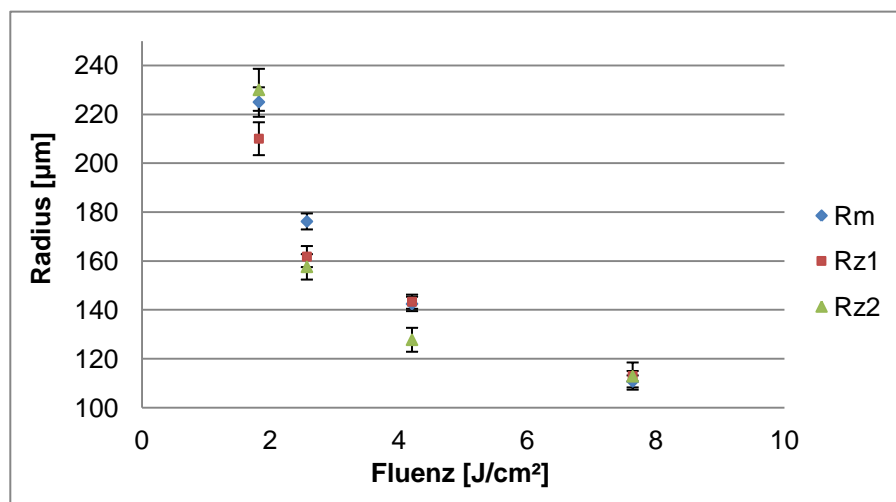
**Abbildung 4-35:** Berechnete (blau) und gemessene (rot) relative Intensitätsverteilung (normiert auf gleichen Leistungseinschluss).

Des Weiteren ist neben der gemessenen auch die berechnete Intensitätsverteilung in der Fokalebene aufgetragen. Beide Verteilungen wurden auf 1 normiert. Mit der Annahme, dass beide Kurven die gleiche Leistung einschließen, können die Verteilungen in einem richtigen Verhältnis zueinander dargestellt werden. Der mittlere Intensitätspeak der gemessenen Verteilung ist wie bei der berechneten vorhanden, jedoch nicht so stark ausgeprägt. Aufgrund von Formabweichungen entstehen mehrere Nebenmaxima. Die Strahlungsleistung verteilt sich somit auf einen größeren Bereich als bei der berechneten Verteilung. In diesem Zusammenhang muss für die Bestimmung des



Wirkungsgrades geklärt werden, wie viel Leistung in einen Bereich bestimmter Größe konzentriert werden soll. Innerhalb des zentralen Peaks der berechneten Intensitätsverteilung befinden sich 74,3 % der gesamten Leistung. Der vom Peak eingeschlossene Bereich ist 7,7  $\mu\text{m}$  breit. Die in diesem Bereich von der gemessenen Intensitätsverteilung eingeschlossene Leistung beträgt rund 36,1 % der Gesamtleistung.

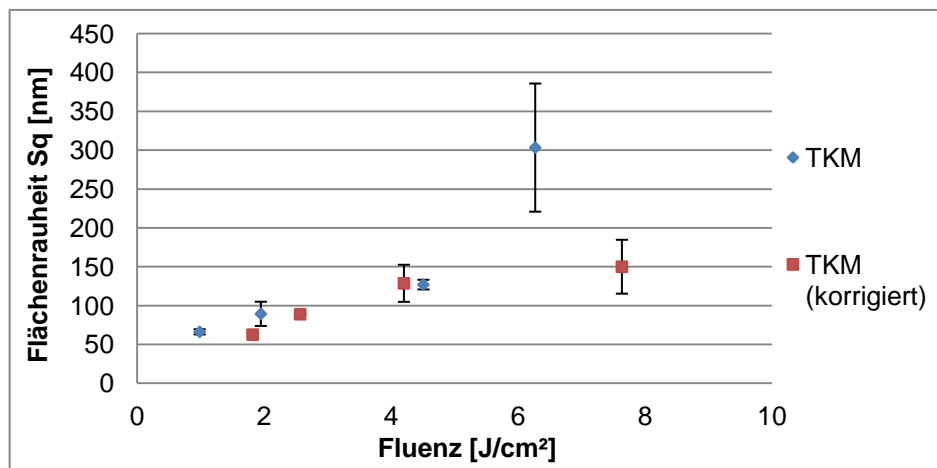
Die Teilkreismaske, welche um den Faktor 2 gestreckt und über das Polynom angepasst wurde, zeigt ebenfalls ein deutlich besseres Verhalten als die nicht angepasste Maske. Mit steigender Fluenz nähern sich die Radien der Zonen einander an, sodass mit einer Fluenz von  $H = 4,21 \text{ J/cm}^2$  eine Fresnel-Zylinderlinse erzeugt werden konnte, deren Mittellinse und 1. Fresnel-Zone einen nahezu gleichen Radius aufweisen. Die Radien entsprechen mit  $R_m = 142,38 \pm 2,95 \mu\text{m}$  und  $R_{z1} = 143,28 \pm 2,9 \mu\text{m}$  bis auf wenige Mikrometer Abweichung der Zielstruktur. Der Krümmungsradius der 2. Fresnel-Zone ist mit  $R_{z2} = 127 \pm 4,9 \mu\text{m}$  kleiner als angestrebt (siehe Abbildung 4-36). Mit einer Fluenz von  $H = 7,64 \text{ J/cm}^2$  konnte eine Fresnel-Linse erzeugt werden, deren Krümmungsradien aller Zonen mit wenigen  $\mu\text{m}$  Abweichung bei rund 112  $\mu\text{m}$  liegen.



**Abbildung 4-36:** Krümmungsradien der Mittellinse und Fresnel-Zonen der mit der angepassten Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinsen.

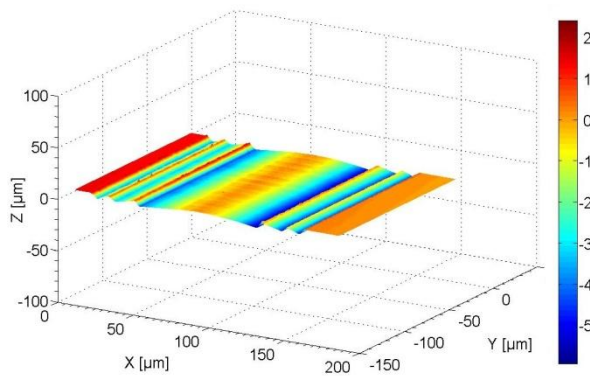
Aufgrund des, im Vergleich zu der Mittellinse und der 1. Fresnel-Zone, kleineren Radius der 2. Fresnel-Zone kann gezeigt werden, dass die Berücksichtigung eines ortsabhängigen Abtrags in Form einer Funktion zur Korrektur der Maskengeometrie herangezogen werden kann. Die verwendete Funktion muss jedoch noch besser angepasst werden, da der Radius der 2. Fresnel-Zone um rund 18  $\mu\text{m}$  kleiner ausgebildet ist als beabsichtigt, d.h. der inhomogene Abtrag wurde leicht überkompensiert. Für

eine exakte Anpassung muss eine möglichst genaue Abtragsfunktion gefunden werden. Diese könnte durch eine Abbildung des homogenen Flecks auf dem Werkstück und Auswertung des Abtrags unter Berücksichtigung der Maskenposition ermittelt werden. Dabei ergibt sich jedoch das Problem, dass die Maskenposition innerhalb des Flecks bekannt sein muss. Eine weitere Möglichkeit stellt eine orts aufgelöste Aufnahme der Intensität des Laserstrahls in der Maskenebene dar. In diesem Fall muss jedoch die maximale Fluenz bekannt sein und die Möglichkeit bestehen, die berechnete und hergestellte Maske exakt im Strahl zu positionieren. Die mit der korrigierten Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen wurden bezüglich der Oberflächenrauheit vermessen. Die ermittelten Rauheitswerte sind in Abbildung 4-37 dargestellt.

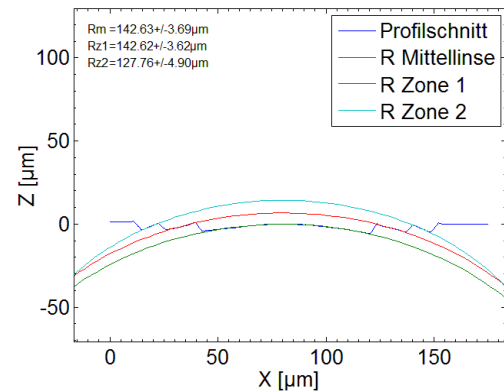


**Abbildung 4-37:** Gemessene Flächenrauheiten  $S_q$  für die mit der korrigierten und nicht korrigierten Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen in Abhängigkeit von der Fluenz.

Mit der korrigierten Maske wurden tendenziell geringere Rauheiten erreicht. Die Unterschiede sind jedoch nicht so stark ausgeprägt wie bei den cos-Masken, da mit der nicht korrigierten Teilkreismaske bereits relativ niedrigere Rauheitswerte erreicht wurden. Die Rauheit der mit einer Fluenz von  $H = 4,21 \text{ J/cm}^2$  hergestellten Fresnel-Zylinderlinse beträgt  $S_q = 128 \pm 23,9 \text{ nm}$  und resultiert vermutlich aus der in Abbildung 4-38 erkennbaren Riffelstruktur auf dem Linsenscheitel. Die Darstellung des Profilschnitts zeigt eine sehr glatte Oberfläche (siehe Abbildung 4-39).

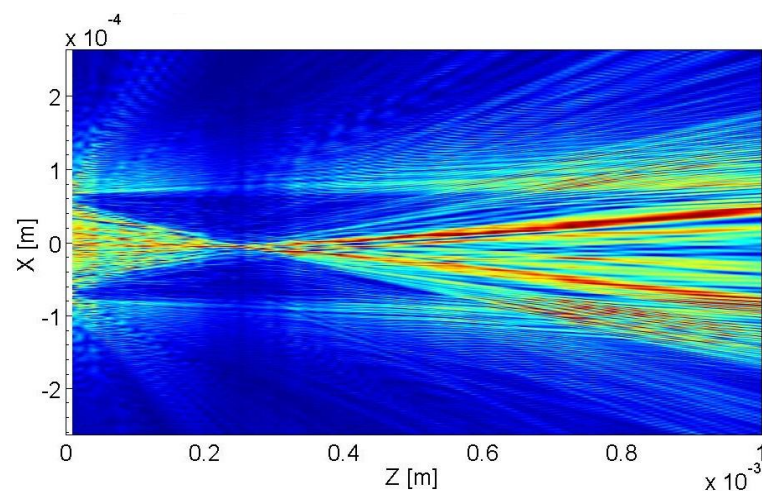


**Abbildung 4-38:** Konfokalmikroskop-Aufnahme der mit der korrigierten Teilkreismaske mit  $H = 4,21 \text{ J/cm}^2$  und  $\text{ÜLP} = 98 \%$  strukturierten Fresnel-Zylinderlinse.



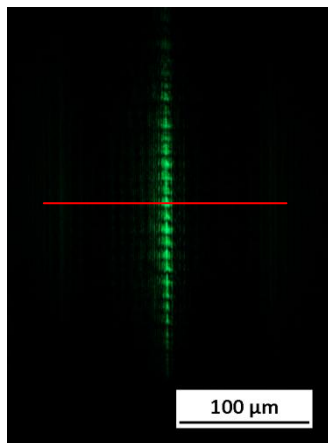
**Abbildung 4-39:** Profilschnitt der mit der korrigierten Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinse.

Die Berechnung der Feldstärke mit dem in Abbildung 4-39 dargestellten Profilschnitt zeigt das beste Strukturierungsergebnis. Die Strahlung wird durch nahezu alle Bereiche fokussiert. Gleichzeitig konnte aufgrund der geringen Oberflächenrauheit die Streustrahlung reduziert werden, was sich positiv auf die Funktion der Linse auswirkt.

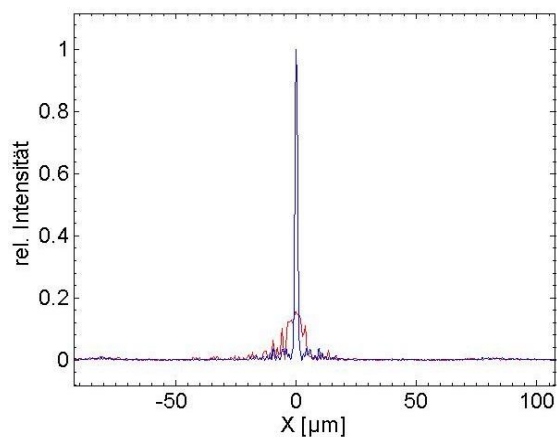


**Abbildung 4-40:** Berechnete Feldstärkeverteilung der mit der Teilkreismaske strukturierten Fresnel-Zylinderlinse ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,  $n=1,5264$ ).

Die höchste Intensität wurde für einen Abstand von  $252 \mu\text{m}$  berechnet, was einer Abweichung von  $23 \mu\text{m}$  von der Soll-Brennweite entspricht. Aus der Abbildung 4-40 ist jedoch zu erkennen, dass die Feldstärke über einen größeren Bereich stark konzentriert ist und sich die Fokusposition nur schwer bestimmen lässt. Die Vermessung der Brennweite der Linse ergab einen Wert von  $250 \mu\text{m}$ . Die in Abbildung 4-41 dargestellte Aufnahme zeigt die Intensitätsverteilung an der ermittelten Fokusposition.

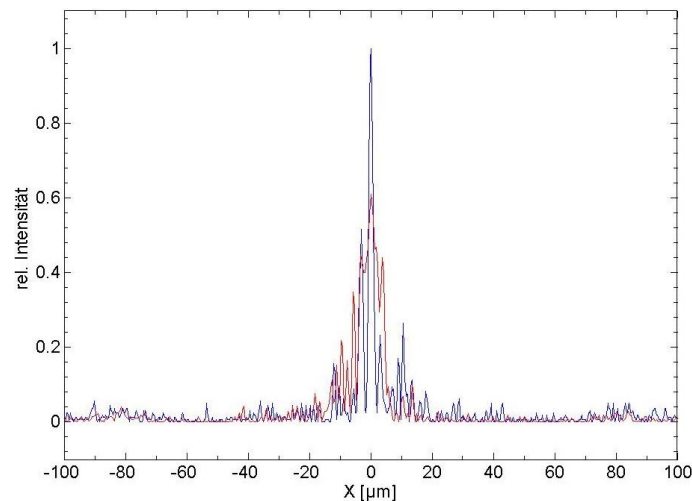


**Abbildung 4-41:** Konfokalmikroskop-Aufnahme der Fokusebene 250 µm über der Substratoberfläche.



**Abbildung 4-42:** Berechnete (blau) und gemessene (rot) relative Intensitätsverteilung (normiert auf gleichen Leistungseinschluss).

Die in Abbildung 4-42 dargestellte gemessene und berechnete Intensitätsverteilung zeigt, dass die Strahlung in einem kleineren Bereich konzentriert wird. Die vom zentralen Peak eingeschlossene Leistung beträgt für die berechnete Intensitätsverteilung 64,1 %. Das ist weniger als bei der mit der cos-Maske berechneten Linse, jedoch ist die Breite des zentralen Peaks mit 4,5 µm deutlich kleiner und die Strahlung somit besser fokussiert. Die gemessene Intensitätsverteilung schließt in diesem Bereich 33 % der Gesamtleistung ein. Bei beiden hergestellten Linsen werden rund 50 % der berechneten Leistung in dem jeweiligen Bereich eingeschlossen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich die Größe der betrachteten Bereiche stark voneinander unterscheiden. Für eine quantitative Bewertung der Intensitätsverteilung nach dem Leistungseinschluss ist es sinnvoll einen Bereich festzulegen auf den sich der Leistungseinschluss bezieht, wie z.B. der Durchmesser einer Lichtleitfaser. Aus Abbildung 4-43 ist erkennbar, dass aufgrund der einzelnen Intensitätspeaks die eingeschlossene Leistung stark vom betrachteten Bereich abhängt. Eichler et al. [Eic10] gibt z.B. für eine Standard-Telekom-Faser einen Kerndurchmesser von 8 µm an. Bei der Betrachtung des Bereichs von  $\pm 4$  µm ausgehend vom Maximum, ergibt sich für die mittels Teilkreismaske strukturierte Linse ein Leistungseinschluss von 48 %.



**Abbildung 4-43:** Gemessene Intensitätsverteilungen im Fokus der mit der cos-Maske (blau) und der Teilkreismaske (rot) strukturierten Fresnel-Zylinderlinse.

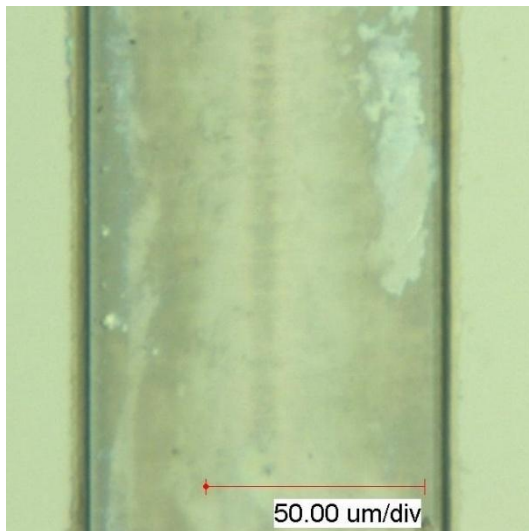
Die gemessenen Verteilungen lassen sich auch qualitativ nur schwer miteinander vergleichen (siehe Abbildung 4-43). In weiterführenden Arbeiten sollten deshalb Auswertungsmethoden und Qualitätskriterien entwickelt und untersucht werden, z.B. auf Basis der 2. Moment-Methode. Des Weiteren sollte eine Anpassung der Maskengeometrie unter Berücksichtigung des realen Abtrags erfolgen, sodass eine gezielte Herstellung von Linsen mit definierten Krümmungsradien möglich wird.

## 4.4 Ergebnisse der Nachbehandlung

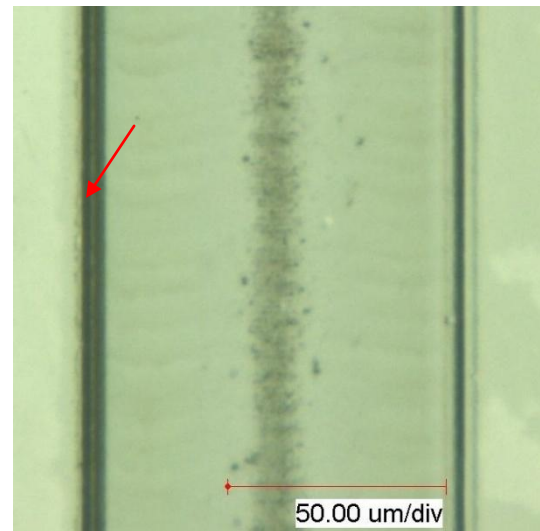
Die Nachbehandlung wurde sowohl an den für die Rauheitsuntersuchungen angefertigten Zylinderlinsen als auch an Fresnel-Zylinderlinsen durchgeführt. Aufgrund der unterschiedlichen Masken ergeben sich Unterschiedliche Rauheiten bei den Parametern.

### 4.4.1 Trockeneisreinigung

Die Reinigung mittels Trockeneis ist ein sehr einfaches Verfahren, welches im Allgemeinen gute Ergebnisse liefert. Die Strukturen wurden dabei nur wenige Sekunden in den mit Trockeneis versetzten Druckluftstrom gehalten. Der Vergleich von Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45 zeigt, dass die in der Struktur befindlichen Ablagerungen vollständig beseitigt werden können. An den Kanten der Strukturen sind jedoch geringfügige Debris-Reste erkennbar (siehe Abbildung 4-45 roter Pfeil).

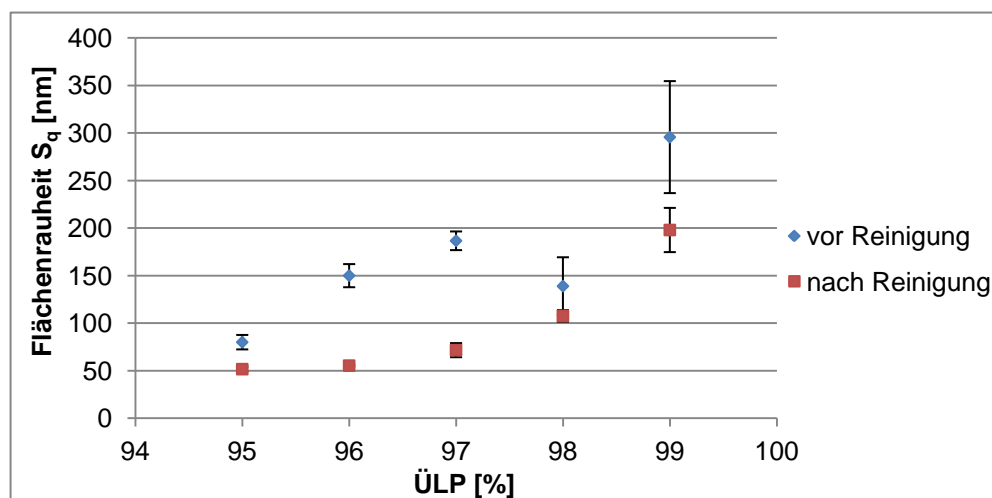


**Abbildung 4-44:** Zylinderlinse nach der Strukturierung ( $\text{ÜLP} = 95\%$ ,  $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$ ).



**Abbildung 4-45:** Mit Trockeneis gereinigte Zylinderlinse, ( $\text{ÜLP} = 95\%$ ,  $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$ ).

Des Weiteren wurde die quadratisch gemittelte Flächenrauheit der Zylinderlinsenoberflächen vor und nach der Trockeneisbehandlung vermessen. Durch die Reinigung konnte die Rauheit teilweise um über 60 % verringert werden, im Mittel um  $43 \pm 18\%$ . Die gemessenen Rauheiten sind in Abbildung 4-46 aufgetragen. Daraus ist erkennbar, dass die Entfernung des Debris mittels Trockeneisreinigung zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächenrauheit führt. Lediglich das stark anhaftende Debris an den äußeren Strukturkanten konnte nicht entfernt werden. Da diese Bereiche außerhalb der optisch funktionalen Fläche liegen, wird dies jedoch als unkritisch bezüglich der Funktionalität angesehen.

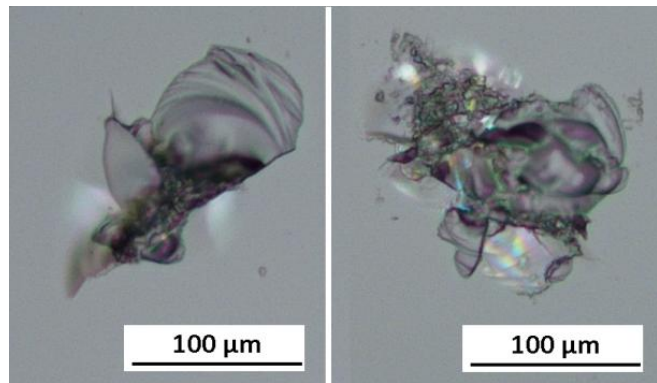


**Abbildung 4-46:** Quadratisch gemittelte Flächenrauheit der mit  $H = 2,05 \text{ J/cm}^2$  und  $\text{ÜLP} = 98\%$  hergestellten Zylinderlinsen vor und nach der Trockeneisreinigung.

Bei der Trockeneisreinigung treten jedoch auch negative Wirkungen auf. Durch den Reinigungsprozess entstehen an der Substratoberfläche charakteristische Defekte in Form muschelförmiger Ausbrüche. In Abbildung 4-48 sind zwei dieser Defekte vergrößert dargestellt. Im Allgemeinen bewegt sich die Größe der Ausbrüche in einem Bereich von kleiner 10  $\mu\text{m}$  bis größer 100  $\mu\text{m}$ .



**Abbildung 4-47:** Mikroskop-Aufnahme von zwei Fresnel-Zylinderlinsen nach der Trockeneisreinigung mit Ausbrüchen innerhalb der Linsenstrukturen.



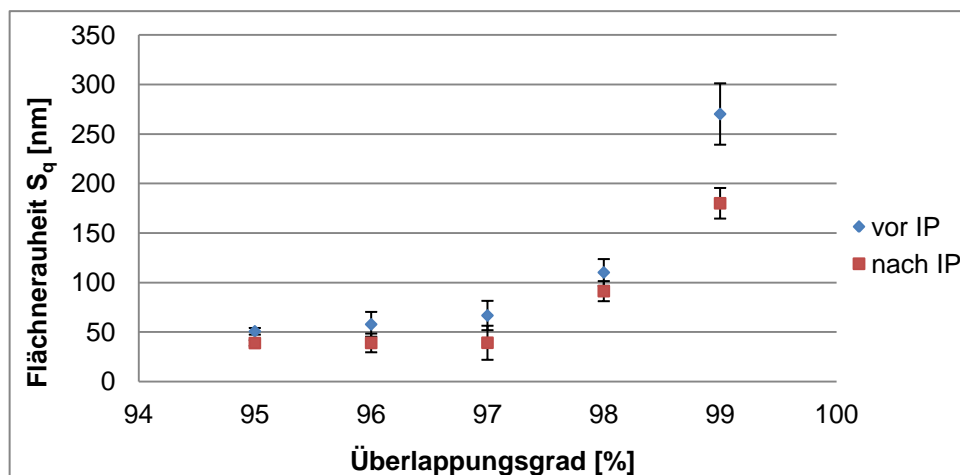
**Abbildung 4-48:** Mikroskop-Aufnahme der entstandenen Ausbrüche auf der Oberfläche.

Die in Abbildung 4-47 dargestellte Mikroskop-Aufnahme hergestellter und gereinigter Fresnel-Zylinderlinsen zeigt Ausbrüche im Bereich der Linsenstruktur. Derartige Defekte führen zu einer Beeinträchtigung der Funktion der Linsen. Für die Entstehung der Ausbrüche können zwei Mechanismen in Frage kommen. Einerseits kann es beim Auftreffen der Trockeneiskristalle auf die Substratoberfläche zum Absplittern von Material kommen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass sich das Material bei Kontakt mit einem Trockeneiskristall lokal sehr stark abkühlt. Die daraus resultierenden Spannungen könnten zum Ausbruch von Material am Auftreffpunkt des Eiskristalls führen. Die Zahl der Ausbrüche ist außerdem Abhängig vom Abstand des Substrates von der Druckluftdüse. Bei größerem Bearbeitungsabstand wurden weniger und kleinere Ausbrüche erzeugt als bei geringem Bearbeitungsabstand. Ein vorheriges Abkühlen der Substrate z.B. durch das langsame Heranführen der Druckluftdüse an die Substrate bis auf einen definierten Bearbeitungsabstand könnte derartige Ausbrüche verhindern.



#### 4.4.2 Ionenstrahlpolieren

Für die Reinigung mittels Ionenstrahl kommen die in Kapitel 3.2.6 beschriebenen Anordnungen zum Einsatz. Die ersten Untersuchungen wurden mit der Kaufmann-Ionenquelle durchgeführt. Der Beschuss erfolgte mit Argon-Ionen mit 1 keV Teilchenenergie unter einem Einfallswinkel von  $80^\circ$  zur Oberflächennormalen. Die Bearbeitung erfolgte über einen Zeitraum von 25 min, bei einem Strahlstrom von  $I_s = 25$  mA. Das Substrat rotierte während der Bearbeitung mit einer Drehzahl von  $u = 20$  u/min, um einen richtungsunabhängigen Prozess zu realisieren. Die Flächenrauheit der Linsen wurde vor und nach dem Polieren vermessen. Die ermittelten Rauheiten sind in Abbildung 4-49 dargestellt.

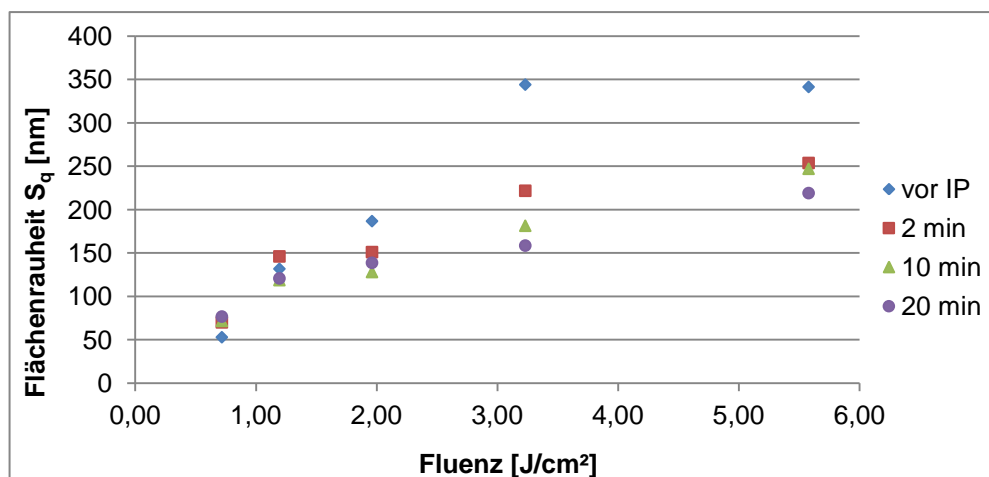


**Abbildung 4-49:** Flächenrauheit der hergestellten Zylinderlinsen in Abhängigkeit vom ÜLP vor und nach 25 min Ionenstrahlpolieren ( $E_{\text{ion}} = 1$  keV,  $I_s = 25$  mA,  $u = 20$  U/min).

Durch die Behandlung mit dem Ionenstrahl konnte die Rauheit aller untersuchten Linsen im Mittel um 30 % gesenkt werden. Der beste Rauheitswert konnten für die Linsen mit der kleinsten Ausgangsrauheit mit  $S_q = 39 \pm 3$  nm erreicht werden. Eine Optimierung der Parameter, wie Strahlstrom, Einfallswinkel, Ionenenergie und Bearbeitungsdauer könnte eine weitere Senkung der Rauheit bewirken. Aufgrund der besseren Neutralisierungsmethode wurden weitere Versuche mit der HF-Ionenquelle durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten an Fresnel-Zylinderlinsen, deren Flächenrauheiten deutlich größer sind als die der Zylinderlinsen. Der Beschuss des Substrates erfolgte ebenfalls unter einem Winkel von  $80^\circ$  zur Oberflächennormalen. Die Teilchenenergie der Ionen ist mit 712 eV kleiner als bei der Kaufmann-Ionenquelle, der Strahlstrom jedoch mit 105 mA mehr als viermal so hoch. Aufgrund der größeren Querschnittfläche des Ionenstrahls kann die Wirkung der Politur nicht abgeschätzt werden. Im Allgemeinen



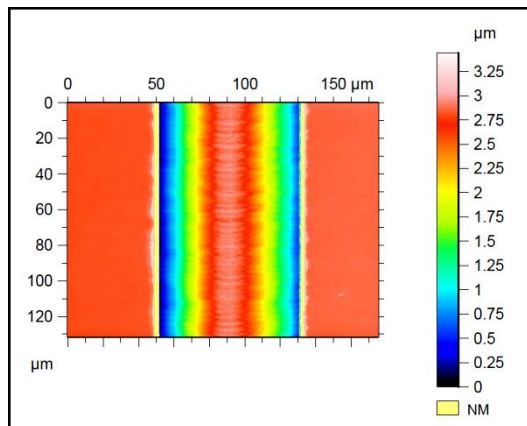
kann für keine der beiden Anordnungen eine Ionenstromdichte bzw. die Anzahl einfallenden Teilchen pro Flächen- und Zeiteinheit am Bearbeitungsort angegeben werden. Aufgrund der nicht abschätzbaren Wirkung wurde die Bearbeitungszeit schrittweise erhöht. Das Substrat wurde nach jeder Bearbeitung ausgebaut und vermessen. Die ermittelten Rauheiten sind in Abbildung 4-50 in Abhängigkeit von der Fluenz und der Bearbeitungszeit dargestellt. Auf die Angabe von Fehlern wurde aufgrund der Übersichtlichkeit verzichtet, diese sind der Anlage A16 zu entnehmen.



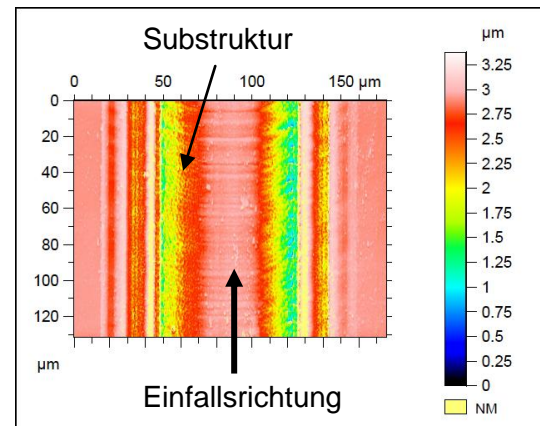
**Abbildung 4-50:** Flächenrauheit der Fresnel-Zylinderlinsen vor und nach der Ionenstrahlpolitur ( $I_s = 105 \text{ mA}$ ,  $E_{\text{ion}} = 712 \text{ eV}$ ).

Aus dem Diagramm kann entnommen werden, dass die Rauheit der Oberflächen mit großer Ausgangsrauheit schrittweise gesenkt werden kann. Dies ist jedoch nur bis zu einem Wert von  $S_q \approx 120 \text{ nm}$ . Bei kleineren Ausgangsrauheiten kommt es zu einem Anstieg. Der Grund dafür liegt im einseitigen Beschuss der Oberfläche und der damit verbundenen Ausbildung charakteristischer Substrukturen, die als kleine Aufwürfe bzw. als noppenartig beschrieben werden können. Bei genauerer Betrachtung dieser Oberflächen zeigt sich, dass diese Strukturen in Einfallsrichtung der Teilchen orientiert sind. Während der Bearbeitung wurde an der Aufnahme des Substrathalters eine Temperatur im Bereich von  $250 \text{ °C}$  gemessen. Es ist anzunehmen, dass an der Substratoberfläche noch weitaus höhere Temperaturen erreicht werden. Bei Glaswerkstoffen führt eine Temperaturänderung immer zu einer Änderung der Viskosität. Durch die Erhöhung der Temperatur wird die Viskosität herabgesetzt, was die Entstehung solcher charakteristischen Substrukturen begünstigt. In Abbildung 4-51 und Abbildung 4-52 sind jeweils die besten Ergebnisse beider Untersuchungen dargestellt. Die mittels Kaufmann-Ionenquelle geglättete Zylinderlinse weist keine Substruktur auf. Im Gegen-

satz dazu ist eine solche Substruktur deutlich im Bereich der Mittellinse der Fresnel-Linse erkennbar.

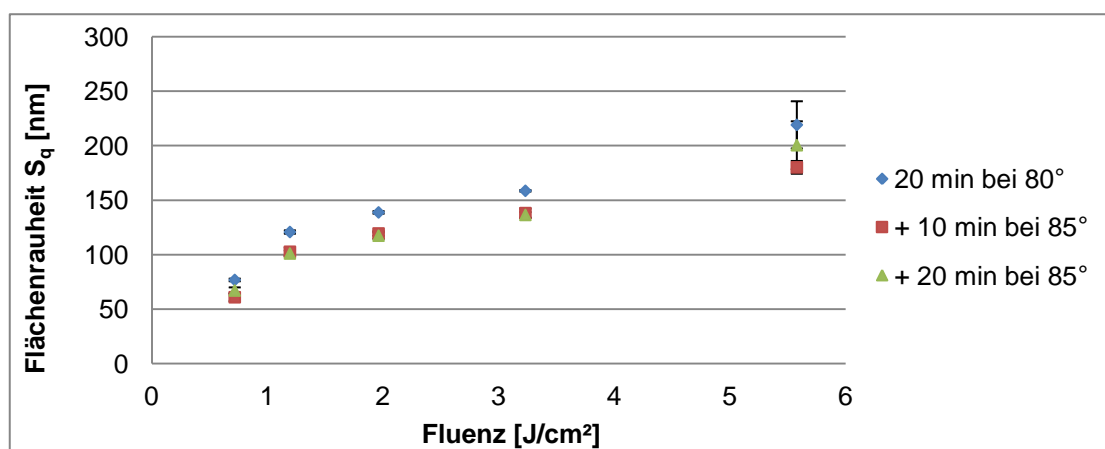


**Abbildung 4-51:** Mittels Kaufmann-Ionenquelle geglättete Zylinderlinse.



**Abbildung 4-52:** Mittels HF-Ionenquelle geglättete Fresnel-Zylinderlinse.

Um die Ausbildung dieser Strukturen zu verhindern wurde der Einfallswinkel um weitere  $5^\circ$  auf  $85^\circ$  vergrößert. Die Fresnel-Zylinderlinsen wurden unter diesem Winkel weitere 10 bzw. 20 min dem Teilchenbeschuss ausgesetzt. Dadurch konnte die Rauheit im Allgemeinen weiter gesenkt werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich bereits nach 10 min ansatzweise neue Substrukturen bilden, die durch eine weitere Bearbeitung mit den gleichen Parametern verstärkt werden. In diesem Falle würde sich die Rauheit wieder erhöhen oder einem Grenzwert entgegen streben. Aus Abbildung 4-53 ist erkennbar, dass die Rauheit nach 20 min nicht weiter gesunken bzw. zum Teil gestiegen ist.

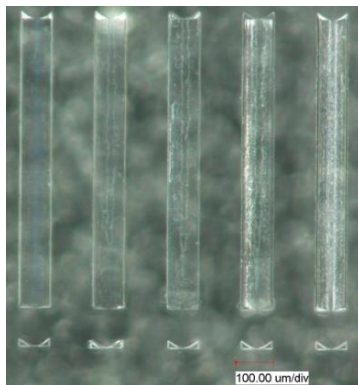


**Abbildung 4-53:** Flächenrauheit der Zylinderlinsen nach Ionenbeschuss mit  $85^\circ$  Einfallswinkel.

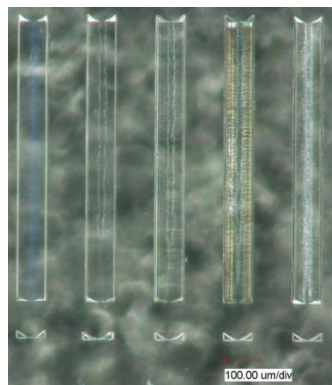
Die Untersuchungen zur Nachbehandlung der Strukturen mittels Ionenbeschuss zeigen, dass unter gewissen Voraussetzungen sehr gute Resultate erzielt werden können. Besonders gute Ergebnisse wurden mit der Kaufmann-Ionenquelle bei drehendem Substrat erreicht, da bei dieser Anordnung keine Substrukturen entstehen.

### 4.4.3 Ätzen

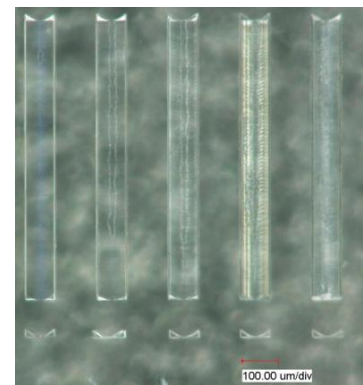
Das Ätzen mittels KOH-Lösung ist ein Verfahren zur Reinigung von Strukturen, die in Quarzglas eingebracht wurden, wie z.B. DPEs [Pfe12]. Ausgehend von den erzielten Ergebnissen wurden Ätzversuche an den hergestellten Zylinderlinsen durchgeführt. Aufgrund der anderen Zusammensetzung des verwendeten Borosilikatglases, ist mit einem anderen Ergebnis zu rechnen als bei Quarzglas. Die Probe wurde aufgrund der unbekannten Stärke der Wechselwirkung nach je 10 min Einwirkzeit aus der 1,7 molaren KOH-Lösung genommen und untersucht.



**Abbildung 4-54:** Zylinderlinsen vor dem Ätzen.

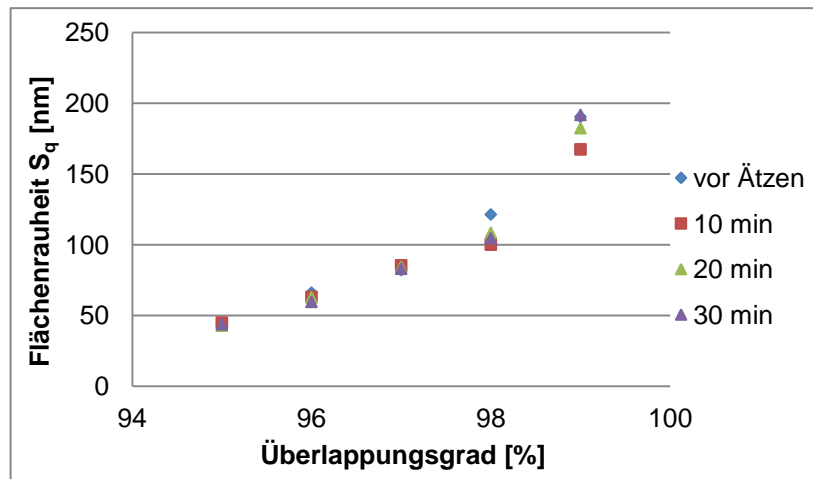


**Abbildung 4-55:** Zylinderlinsen nach 10 min Ätzen mit KOH-Lösung.



**Abbildung 4-56:** Zylinderlinsen nach 30 min Ätzen mit KOH-Lösung.

In Abbildung 4-54, Abbildung 4-55 und Abbildung 4-56 sind Mikroskopaufnahmen der Zylinderlinsen vor und nach dem Ätzen dargestellt. Bereits nach 10 min Einwirkzeit erscheinen die Linsen deutlich sauberer. Nach weiteren 20 min ist nur noch eine geringe Veränderung an den Strukturen zu beobachten. Nach jeder Periode wurde die Flächenrauheit der Linsen vermessen. Die gemessenen Rauheiten sind in Abbildung 4-57 dargestellt.



**Abbildung 4-57:** Gemessene Flächenrauheit der Zylinderlinsen in Abhängigkeit vom ÜLP und der Einwirkzeit.

Die Wirkung des Ätzprozesses auf die Flächenrauheit der Strukturen ist nicht eindeutig. Beim Ätzen von Bor-dotiertem Silizium mit KOH entsteht Borosilikatglas, welches bei einer hohen Bor-Konzentration als Ätz-Stopp wirkt [Mic14]. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Ätzgeschwindigkeit im Allgemeinen kleiner ist als bei Quarzglas. Aufgrund der geringen Ätzgeschwindigkeit ist die Wirkung auf die Strukturen selbst gering. Für Partikel die sich in und auf den Strukturen befinden wird angenommen, dass sich das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen positiv auf den Ätzprozess auswirkt. Dies hat zu Folge, dass die Partikel innerhalb der Strukturen entfernt werden ohne diese selbst zu verändern. Bei rauen Oberflächen könnte dies zu einer Vergrößerung der Rauheit führen, da durch das Ätzen die vom Debris überdeckte tatsächliche Oberfläche hervor tritt. Ein solcher Anstieg der Rauheit ist in Abbildung 4-57 bei einem ÜLP von 99 % zu erkennen. Bei einer Oberfläche mit geringer Ausgangsrauheit, wie z.B. bei einem ÜLP von 95 %, ist keine signifikante Veränderung der Flächenrauheit erkennbar.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den Einsatz von Masken mit spezieller Geometrie ist die Fertigung von Mikrooptiken mittels Fluorlasermikrostrukturierung möglich. Dies konnte am Beispiel von Fresnel-Zylinderlinsen gezeigt werden. Die Berechnung der Maskengeometrie kann mit beiden vorgestellten Methoden erfolgen, jedoch erweist sich Berechnungsmethode für die Teilkreismasken als die bessere. Diese Methode ist wesentlich einfacher zu implementieren kommt und ohne bzw. mit wenigen Skalierungs- und Korrekturfaktoren aus. Die Strukturierung mit den berechneten Masken zeigt, dass der Strukturierungsprozess bei zu kleiner Maskenausdehnung in Vorschubrichtung schwer kontrollierbar ist. Dies konnte durch die Streckung der Maske verbessert werden. Die korrigierten Masken verhalten sich annähernd so, wie in der Simulation berechnet. Des Weiteren ist die Kompensation negativer Einflussfaktoren, wie ein inhomogener Abtrag, durch eine geeignete Anpassung der Maskengeometrie möglich. Die diesbezüglich korrigierte und hergestellte Maske ist leicht überkompensiert, dennoch kann der vorgestellte Ansatz zur Korrektur der Masken eingesetzt werden kann. Die Voraussetzung für eine korrekte Berechnung ist die Kenntnis der Fluenz- bzw. Intensitätsverteilung und die genaue Position der Maske im Laserstrahl. Die inhomogene Intensitätsverteilung wirkt sich auch negativ auf die Messung der Leistung aus. Durch die Streckung der Masken konnte die Leistung in der Bearbeitungskammer deutlich erhöht werden, was einer Verschiebung der Messwerte in einen sichereren Messbereich des Leistungsmessgerätes entspricht. Dennoch wurden bei der Auswertung der Einzelabträge stets Abweichungen zwischen der zurückgerechneten und der über die Leistung eingestellten Fluenz festgestellt. Für die gezielte Herstellung von Fresnel-Zylinderlinsen mit definierten Krümmungsradien ist eine genaue Messung und Einstellung der Fluenz nötig. Mit den korrigierten Masken konnten Fresnel-Zylinderlinsen erzeugt werden, die bezüglich des Krümmungsradius sehr nahe an die Zielstruktur herankommen. Die optische Auswertung der Linsen zeigte bereits gute Ergebnisse. Beide Linsen fokussieren mehr als 30 % der ermittelten relativen Gesamtleistungen in dem jeweiligen berechneten Bereich. Eine Verringerung der Rauheit und die Korrektur des Radius der 2. Fresnel-Zone würde die Funktion der Linsen weiter verbessern. Die Untersuchung der optischen Wirkung ist mit dem verwendeten Aufbau möglich. Es muss jedoch geklärt werden, welchen Anforderungen eine solche Linse bezüglich der Leistungsumsetzung und der Intensitätsverteilung gerecht werden muss. Erst dann ist eine quantitative Bewertung der Funktion wirklich sinnvoll.

Die Reinigung der Linsen ist prinzipiell mit allen untersuchten Verfahren möglich. Die Wirkung auf die Strukturen ist jedoch sehr unterschiedlich. Die angewendeten Verfahren müssen für einen effektiven Einsatz weiter optimiert werden. Insofern die Verfahren innerhalb einer Fertigungsstrecke umgesetzt werden können, ist deren Kombination im Sinne eines Reinigungsschrittes und eines Polierschrittes durchaus sinnvoll.

Mit den gewonnenen Erkenntnissen zur Herstellung von Fresnel-Zylinderlinsen im Maskenprojektionsverfahren wird es in Zukunft möglich sein, diese Linsen in hoher Qualität herzustellen. Unter der Einbeziehung der Verfahren zur Nachbehandlung kann ein sehr effektiver Fertigungsprozess realisiert werden. Derartig hergestellte Fresnel-Zylinderlinsen könnten der Kollimation der Strahlung stark divergenter Strahlungsquellen wie z.B. kantenemittierenden Laserdioden dienen.

Das Ziel weiterer Untersuchungen sollte die Herstellung rotationssymmetrischer Linsen sein. Derartige Linsen haben einen deutlich größeren Anwendungsbereich. Die Herstellung solcher Linsen kann durch die Rotation der Maske im Laserstrahl erfolgen, was die Berechnung spezieller Rotationsmasken erfordert. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sollten diesbezüglich Untersuchungen durchgeführt werden.

## Literaturverzeichnis

- [Ber09] Bertram, René: Fluorlasermikrobearbeitung von ausgewählten Materialien, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik / Physik / Informatik, Diplomarbeit, 2009
- [Bli10] Bliedtner, Jens; Gräfe, Günter: „Optiktechnologie Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele“. 2. aktualisierte Auflage, Leipzig: Carl Hanser Verlag, 2010; ISBN: 978-3446422155
- [Bre06] Werkzeugmaschinen, Mikrosystemtechnik, Oberflächentechnik Großflächige Mikrostrukturierung C. Brecher, R. Schmitt, S. Lange, F. Koerfer, F. Niehaus, R. Widemann Copyright Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, Düsseldorf wt Werkstattstechnik online Jahrgang 96 (2006) H. 5
- [Bri09] Brinkmann, Matthias; Braun, Franz-Josef; Hagemann, Malte; Jäger, Erwin: Diffraktive Optische Elemente erobern den Markt. Vorteile gegenüber klassischen optischen Komponenten. In: Optik & Photonik 4 (2009), Nr. 1, S. 50-54
- [Büt15] Büttner, S.: Vergleich zweier Verfahren zum CO<sub>2</sub>-Laserglätten von DPEs in Quarzglas, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Forschungs- und Entwicklungsmodul I-Bericht, 2015
- [Büt15a] Büttner, S.: Entwicklung eines Programmmoduls zur Berechnung von Maskengeometrien für die Strukturierung von Zylinderlinsen mittels Maskenprojektionsverfahren, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Forschungs- und Entwicklungsmodul II-Bericht, 2015
- [Dem06] Demtröder, W.: Experimentalphysik - Elektrizität und Optik, 4. Auflage, Springer- Verlag, Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-33794-6
- [Dig12] Digital Surf, Handbuch MountainsMap, Version 6, Digital Surf- Surface Intelligence, Besançon/ Frankreich, 2015, S.512
- [DIN12] DIN EN ISO 25178-2; Geometrische Produktspezifikation (GPS)- Oberflächenbeschaffenheit Flächenhaft, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012
- [Eic10] Eichler J., Eichler H.J.: Laser- Bauformen, Strahlführung, Anwendung, 7. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag ,Berlin Heidelberg New York, 2010, S.401

- [Ede09] Edelmann J., Worsch Ch.: Mikrostrukturierung von Glas durch Heißprägen von beschichteten Glaswafern, Chemnitz, Fraunhofer-Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Abschlussbericht, 2009
- [Exp15] URL:[http://www.experimenta.de/tl\\_files/bilder/ausstellung/bereichestationen/fresnellinse6.jpg](http://www.experimenta.de/tl_files/bilder/ausstellung/bereichestationen/fresnellinse6.jpg)
- [Fri06] Fricke-Begemann Th., Ihlemann J., Meinertz J.: Diffraktive Mikrolinsen: Herstellung durch direkte Laserstrukturierung, Göttingen, DGaO-Proceedings 2006 ,ISSN: 1614-8436
- [Gar08] Garrard K., Sohn A., Dow Th.: DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF KINOFORM LENSES, North Carolina, North Carolina State University, Precision Engineering Center Raleigh, Poster, 2008
- [Gro15] Gross R. :Physik III Kapitel 5, Vorlesungsskript , Walther-Meißner-Institut, URL:[http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross\\_Physik\\_III\\_Kap\\_5.pdf](http://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/Physik3/Gross_Physik_III_Kap_5.pdf), stand 04.06.2015
- [Grü15] Grüttner, Hagen: persönliche Mitteilung vom 21.04.2015
- [Häh06] Hähnel, Falk: Mikrostrukturierung mittels Fluorlaser, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Diplomarbeit, 2006
- [Hüg92] Hügel H.: Strahlwerkzeuge Laser - Eine Einführung., Stuttgart, Teubner-Studienbücher Maschinenbau, 1992
- [IOF14] IOF, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, URL:<http://www.iof.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder1/optische-komponenten-systeme/led-oled-optiken/mikrooptik-kieselglas.html>, stand 17.09.2014
- [Jah04] Jahns J., Brenner K.-H.: Microoptics-From Technology to Applications Springer-Verlag S.29-41, 2004, ISBN: 978-1-4419-1931-1 (Print) 978-0-387-34725-7 (Online)
- [Klo07] Klocke F., König W.: Fertigungsverfahren- Abtragen, Generieren, Lasermaterialbearbeitung, 4. Auflage, Springer Berlin Heidelberg New York, 2007
- [Lam00] Lambda Physik AG: LPFTM 200 User Manual. Göttingen: Lambda Physik AG, 2000
- [Mic05] 3D Micromac AG, Chemnitz, Technikhandbuch Fluor Laser Station EX-157, 2005



- [Mic14] MicroChemicals, Broschuere, URL: [http://www.microchemicals.com/broschueren/silizium\\_quarz\\_glas\\_wafer\\_2014\\_de.pdf](http://www.microchemicals.com/broschueren/silizium_quarz_glas_wafer_2014_de.pdf), stand 23.08.2015
- [Neu14] Neumann V.; Olbrich M.: Rigerose Berechnungsverfahren in der Lasertechnik; Photonik , 2/2014 S. 44-47
- [Olb10] Olbrich, M. ; Erstellung eines wellenoptischen Programmes zur Berechnung der Laserstrahlpropagation nach dem Huygens-Fresnelschen Prinzip, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Bachelorarbeit, 2010
- [Olb12] Olbrich, M. ; Theoretische und experimentelle Untersuchungen zu DPE-Strukturen, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Masterarbeit, 2012
- [OSh04] O'Shea, Donald C.; Suleski, Thomas J.; Kathman, Alan D.; Prather, Dennis W.: Diffractive Optics. Design, Fabrication, and Test. Bellingham, Washington USA: SPIE, 2004, ISBN: 978-0-8194-5171-2
- [Ped05] Pedrotti F., Pedrotti L., Bausch W., Schmitd H.: Optik für Ingenieure-Grundlagen, 3. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN-10 3-540-22813-6, 2005, S.161
- [Pfe12] Pfeifer, Michael.: F2-Lasermikrostrukturierung von diffraktiven optischen Elementen in Quarzglas, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Masterarbeit, 2012
- [Pfe15] Pfeifer, Michael: persönliche Mitteilung vom 20.04.15
- [Pop05] Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung - Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, ISBN 3-540-21406-2 Springer Berlin Heidelberg New York 2005, S.309-314
- [Püs14] Püschel Th.: Fluorlasermikrostrukturierung von Mikrozyylinderlinsen in D263T, Mittweida, Hochschule Mittweida, Mathematik/ Naturwissenschaften/ Informatik, Bachelorarbeit, 2014
- [Ric15] Richter F., Welzel S.: Vorlesungssscript Optik – Linsen und optische Instrumente, TU Chemnitz, URL:<https://www.tuchemnitz.de/physik/PHFK/LEHRE/.SCRIPT/script1/Optik.pdf>, stand 04.06.2015
- [Ris12] A. Risse: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionstechnik, DOI 10.1007/978-3-8348-8312-4\_10, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2012

- [Roh15] Rohner M., Ulrich D.: Fresnellinsen , Vortrag, FH Nordwestschweiz, 2015
- [Sch05] Datenblatt D263T, Schott AG, verfügbar am 04.03.2015  
URI: [https://cmi.epfl.ch/organisation/files/D263T\\_d.pdf](https://cmi.epfl.ch/organisation/files/D263T_d.pdf)
- [Sch12] Schäfer, D.: Ursächliche Prozesse der Brechungsindexmodifikation bei der Femtosekunden-Laserstrukturierung von Wellenleitern in Dielektrika, Aachen, RTWH Aachen, Fakultät Maschinenwesen, Dissertation, 2012
- [Sch15] Persönliche Mitteilung: Schott AG am 17.06.2015
- [Spe15] URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/fresnel-linse/5345> ,  
stand 04.06.2015
- [Sta02] Stankovic S.: Diffraktive optische Elemente für moderne mikrooptische Systeme, Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Physik, Dissertation, 2002
- [Ste15] Persönliche Mitteilung Prof. Dr. Bernhardt Steiger 04.06.2015
- [Tur97] Turunen J., Wyrowski F., Diffraktiv Optics- for Industrial and Commercial Applications, 1. Auflage, Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1997, S.105-114
- [Wip05] Wippermann F., Duparre J., Dannberg P., Schreiber P., Bräuer A.: Herstellung gechirpter Mikrolinsenarrays durch Reflow von Fotoresist, Fraunhofer IOF Jahresbericht, 2005

# Anhang

## A1

Mittels Cauchy-Koeffizienten berechnete Brechzahlen n

$\lambda$ [nm]	n	$\lambda$ [nm]	n	$\lambda$ [nm]	n	$\lambda$ [nm]	n	$\lambda$ [nm]	n	$\lambda$ [nm]	n
400	1,5411	484	1,5303	568	1,5242	652	1,5203	736	1,5177	820	1,5159
402	1,5408	486	1,5301	570	1,5241	654	1,5202	738	1,5177	822	1,5159
404	1,5404	488	1,5300	572	1,5239	656	1,5202	740	1,5176	824	1,5158
406	1,5401	490	1,5298	574	1,5238	658	1,5201	742	1,5176	826	1,5158
408	1,5398	492	1,5296	576	1,5237	660	1,5200	744	1,5175	828	1,5158
410	1,5394	494	1,5294	578	1,5236	662	1,5199	746	1,5175	830	1,5157
412	1,5391	496	1,5292	580	1,5235	664	1,5199	748	1,5174	832	1,5157
414	1,5388	498	1,5291	582	1,5234	666	1,5198	750	1,5174	834	1,5157
416	1,5385	500	1,5289	584	1,5233	668	1,5197	752	1,5173	836	1,5156
418	1,5382	502	1,5287	586	1,5232	670	1,5197	754	1,5173	838	1,5156
420	1,5379	504	1,5286	588	1,5231	672	1,5196	756	1,5172	840	1,5156
422	1,5376	506	1,5284	590	1,5230	674	1,5195	758	1,5172	842	1,5155
424	1,5373	508	1,5282	592	1,5229	676	1,5195	760	1,5171	844	1,5155
426	1,5370	510	1,5281	594	1,5228	678	1,5194	762	1,5171	846	1,5155
428	1,5368	512	1,5279	596	1,5227	680	1,5193	764	1,5171	848	1,5154
430	1,5365	514	1,5278	598	1,5226	682	1,5193	766	1,5170	850	1,5154
432	1,5362	516	1,5276	600	1,5225	684	1,5192	768	1,5170	852	1,5154
434	1,5359	518	1,5275	602	1,5224	686	1,5191	770	1,5169	854	1,5153
436	1,5357	520	1,5273	604	1,5223	688	1,5191	772	1,5169	856	1,5153
438	1,5354	522	1,5272	606	1,5222	690	1,5190	774	1,5168	858	1,5153
440	1,5352	524	1,5270	608	1,5221	692	1,5190	776	1,5168	860	1,5152
442	1,5349	526	1,5269	610	1,5220	694	1,5189	778	1,5167	862	1,5152
444	1,5347	528	1,5267	612	1,5219	696	1,5188	780	1,5167	864	1,5152
446	1,5344	530	1,5266	614	1,5219	698	1,5188	782	1,5167	866	1,5151
448	1,5342	532	1,5264	616	1,5218	700	1,5187	784	1,5166	868	1,5151
450	1,5339	534	1,5263	618	1,5217	702	1,5187	786	1,5166	870	1,5151
452	1,5337	536	1,5262	620	1,5216	704	1,5186	788	1,5165	872	1,5150
454	1,5335	538	1,5260	622	1,5215	706	1,5185	790	1,5165	874	1,5150
456	1,5332	540	1,5259	624	1,5214	708	1,5185	792	1,5165	876	1,5150
458	1,5330	542	1,5258	626	1,5213	710	1,5184	794	1,5164	878	1,5150
460	1,5328	544	1,5256	628	1,5213	712	1,5184	796	1,5164	880	1,5149
462	1,5326	546	1,5255	630	1,5212	714	1,5183	798	1,5163	882	1,5149
464	1,5323	548	1,5254	632	1,5211	716	1,5183	800	1,5163	884	1,5149
466	1,5321	550	1,5252	634	1,5210	718	1,5182	802	1,5163	886	1,5148
468	1,5319	552	1,5251	636	1,5209	720	1,5181	804	1,5162	888	1,5148
470	1,5317	554	1,5250	638	1,5208	722	1,5181	806	1,5162	890	1,5148
472	1,5315	556	1,5249	640	1,5208	724	1,5180	808	1,5161	892	1,5148
474	1,5313	558	1,5248	642	1,5207	726	1,5180	810	1,5161	894	1,5147
476	1,5311	560	1,5246	644	1,5206	728	1,5179	812	1,5161	896	1,5147
478	1,5309	562	1,5245	646	1,5205	730	1,5179	814	1,5160	898	1,5147
480	1,5307	564	1,5244	648	1,5205	732	1,5178	816	1,5160	900	1,5146
482	1,5305	566	1,5243	650	1,5204	734	1,5178	818	1,5160		

Formel für die Berechnung des Brechzahlverlaufs nach Cauchy [Ped05]

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

Die Berechnung der Cauchy-Koeffizienten A, B und C erfolgte mit der Solver-Funktion des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft® Office Excel® der Firma Microsoft Cooperation.

## A2

Herleitung der Gleichung (3-12) ausgehend von der Gleichung für den Radius R eines Kugelausschnitts:

$$r = \sqrt{h(2R - h)}$$

$$r^2 = 2hR - h^2$$

$$2Rh = r^2 + h^2$$

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$$

## A3

Radien der mir der cos-Maske simulierten Fresnel-Zylinderlinsen

cos-Maske		Radius Mittellinse [µm]	Radius Zone 1 [µm]	Radius Zone 2 [µm]	ÜLP
Fluenz [J/cm²]	Abtrag [nm]				
1	65,1	708,6	726,1	737,9	95%
2	99,62	463,8	476,4	485,3	
3	119,8	386,1	397,3	405,3	
4	134,1	345,1	355,7	363,4	
5	145,2	318,8	329,1	336,6	
1	65,1	306,6	315,1	323,3	98%
2	99,62	201,6	209,9	217,6	
3	119,8	168,4	177	185	
4	134,1	150,9	159,9	168,1	
5	145,2	139,8	149	157,4	
1	65,1	105,7	116,2	125,6	99%
2	99,62	72,4	85,9	97,2	
3	119,8	62,3	77,3	89,4	
4	134,1	57,2	73,1	85,6	
5	145,2	54	70,5	83,4	

**A4**

Radien der mit der Teilkreismaske simulierten Fresnel-Zylinderlinsen

<b>cos-Maske</b>		<b>Radius Mittellinse [μm]</b>	<b>Radius Zone 1 [μm]</b>	<b>Radius Zone 2 [μm]</b>	<b>ÜLP</b>
<b>Fluenz [J/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Abtrag [nm]</b>				
<b>1</b>	65,1	755,7	722	688,8	<b>95%</b>
<b>2</b>	99,62	494,6	473,7	453,2	
<b>3</b>	119,8	411,6	395	378,7	
<b>4</b>	134,1	367,9	353,7	339,6	
<b>5</b>	145,2	339,9	327,2	314,7	
<b>1</b>	65,1	327,1	313,5	301,6	<b>98%</b>
<b>2</b>	99,62	214,9	208,8	203,6	
<b>3</b>	119,8	179,4	176,1	173,3	
<b>4</b>	134,1	160,7	159	157,7	
<b>5</b>	145,2	148,9	148,2	144,2	
<b>1</b>	65,1	112,1	115,6	118,7	<b>99%</b>
<b>2</b>	99,62	76,4	85,4	92,7	
<b>3</b>	119,8	65,6	76,8	85,6	
<b>4</b>	134,1	60	72,5	82,2	
<b>5</b>	145,2	56,6	69,9	80,2	

**A5**

Gemessene Radien der mit der cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

<b>Abtrag [nm]</b>	<b>Fluenz [J/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Rm [μm]</b>	<b>Standard- abweichung</b>	<b>Rz1 [μm]</b>	<b>Standard- abweichung</b>	<b>Rz2 [μm]</b>	<b>Standard- abweichung</b>
68,3	1,07	144,64	4,83	156,67	10,75	216,72	30,79
96,9	1,89	128,68	4,3	135,45	9,03	184,26	17,04
120,3	3,03	101,63	4,2	92,03	5,96	122,62	10,08
145,3	5,01	91,24	5,48	79,11	4,26	108,91	11,36

Gemessene Tiefen der Einzelabträge zur Berechnung der Fluenz über das Lambert-Beer'sche-Gesetz

<b>Tiefe der Einzelabträge in μm (20 Pulse)</b>				
<b>Feld</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Messung 1</b>	1,35	1,95	2,44	2,98
<b>Messung 2</b>	1,33	1,89	2,38	2,78
<b>Messung 3</b>	1,34	1,82	2,44	2,74
<b>Messung 4</b>	1,44	2,09	2,36	3,12

**A6**

Gemessene Radien der mit der cos-Maske und angepassten Parametern hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

Abtrag [nm]	Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Rm [μm]	Standard- abweichung	Rz1 [μm]	Standard- abweichung	Rz2 [μm]	Standard- abweichung
72,3	1,15	351,44	16,59	302,05	28,87	602,5	91,65
117,9	2,89	186,53	4,31	162,35	9,92	212,2	14,93
123,2	3,21	157,93	3,15	136,92	6,62	181,29	11,54
159	6,60	125,06	4,28	112,98	3,67	143,63	10,29

Gemessene Tiefen der Einzelabträge zur Berechnung der Fluenz

Tiefe der Einzelabträge in μm (20 Pulse)				
Feld	1	2	3	4
<b>Messung 1</b>	1,27	2,28	2,36	3
<b>Messung 2</b>	1,59	2,47	2,68	3,06
<b>Messung 3</b>	1,57	2,44	2,35	3,33
<b>Messung 4</b>	1,35	2,24		3,33

**A7**

Gemessene Flächenrauheit der mit der cos-Maske strukturierten Fresnel-Zylinderlinsen

Flächenrauheit S <sub>q</sub> in nm					
Fluenz[J/cm <sup>2</sup> ]	0,63	1,07	1,89	3,03	5,01
<b>Messung 1</b>	44,5	116	180	319	348
<b>Messung 2</b>	62,5	145	204	353	330
<b>Messung 3</b>	51,6	134	176	360	346
<b>Mittelwert</b>	52,9	131,7	186,7	344,0	341,3
<b>Sandartabw.:</b>	9,1	14,6	15,1	21,9	9,9

**A8**

Gemessene Radien der mit der Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

Abtrag [nm]	Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Rm [μm]	Standard- abweichung	Rz1 [μm]	Standard- abweichung	Rz2 [μm]	Standard- abweichung
64,5	0,99	397,5	15,2	329,26	8,59	462,35	23,9
98,4	1,95	238,84	7,06	217,14	7,92	293,93	12,7
140,1	4,51	160,2	8,16	137,85	6,41	188,38	15,63
156,5	6,27	133,96	24,42	92,6	5,99	123,61	87

## Gemessene Tiefen der Einzelabträge zur Berechnung der Fluenz

Tiefe der Einzelabträge in $\mu\text{m}$ (20 Pulse)				
Feld	1	2	3	4
Messung 1	1,2	2,2	2,8	2,93
Messung 2	1,5	2,2	2,8	3,01
Messung 3	1,2	1,8	2,8	3,45
Messung 4		1,8	2,8	

## A10

## Gemessene Radien der mit der korrigierten cos-Maske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

Abtrag [nm]	Fluenz [J/cm <sup>2</sup> ]	Rm [ $\mu\text{m}$ ]	Standard- abweichung	Rz1 [ $\mu\text{m}$ ]	Standard- abweichung	Rz2 [ $\mu\text{m}$ ]	Standard- abweichung
98	1,94	188,81	3,83	176,39	6,05	244,41	14,96
128,2	3,55	153,2	4,59	152,12	5,29	174,09	11,66
150	5,51	136,2	2,51	136,4	4	158,88	8,59
160,5	6,80	121,9	4,11	120	5,32	147,59	5,32
160,5	6,80	117,41	3,27	129,67	5,21	142,53	18,85

## Gemessene Tiefen der Einzelabträge zur Berechnung der Fluenz

Tiefe der Einzelabträge in $\mu\text{m}$					
Feld	1	2	3	4	5
Messung 1	1,94	2,55	3,01	2,97	3,14
Messung 2	2,06	2,61	3,03	3,35	3,2
Messung 3	1,88	2,53	2,96	3,31	3,2
Messung 4					3,3

## A11

## Gemessene Flächenrauheit der mit der korrigierten und nicht korrigierten cos-Maske strukturierten Fresnel-Zylinderlinsen

Flächenrauheit  $S_q$  in nm cos-Maske unkorrigiert

Fluenz[J/cm <sup>2</sup> ]	0,63	1,07	1,89	3,03	5,01
Messung 1	44,5	116	180	319	348
Messung 2	62,5	145	204	353	330
Messung 3	51,6	134	176	360	346
Mittelwert	52,9	131,7	186,7	344,0	341,3
Sandartabw.:	9,1	14,6	15,1	21,9	9,9

Flächenrauheit  $S_q$  in nm cos-Maske korrigiert

Fluenz [ $J/cm^2$ ]	1,94	3,55	5,51	6,80	6,80
Messung 1	95,1	117	151,0	130,0	124,0
Messung 2	74,4	100	145,0	139,0	151,0
Messung 3	101,0	85,2	143,0	129,0	135,0
Mittelwert:	90,2	100,7	146,3	132,7	136,7
Standardabweichung:	14,0	15,9	4,2	5,5	13,6

## A12

Gemessene Radien der mit der korrigierten Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

Abtrag [nm]	Fluenz [ $J/cm^2$ ]	Rm [ $\mu m$ ]	Standard-abweichung	Rz1 [ $\mu m$ ]	Standard-abweichung	Rz2 [ $\mu m$ ]	Standard-abweichung
95	1,82	225	6,04	210	6,73	230	8,6
112,1	2,57	176,14	3,28	161,76	4,31	157,55	5,2
136,6	4,21	142,38	2,95	143,28	2,9	127,7	4,9
166,3	7,64	110,67	2,45	112,85	5,56	112,78	2,15

Gemessene Tiefen der Einzelabträge zur Berechnung der Fluenz

Tiefe der Einzelabträge in $\mu m$ (20 Pulse)				
Feld	1	2	3	4
Messung 1	1,82	2,13	2,64	3,41
Messung 2	1,86	2,22	2,67	3,18
Messung 3	1,97	2,25	2,8	3,27
Messung 4	1,95	2,37	2,82	3,44

## A13

Gemessene Rauheiten der mit der nicht korrigierten und korrigierten Teilkreismaske hergestellten Fresnel-Zylinderlinsen

Flächenrauheit  $S_q$  in nm (Teilkreismaske unkorrigiert)

Fluenz [ $J/cm^2$ ]	0,99	1,95	4,51	6,27
Messung 1	62,9	105	129	398
Messung 2	69,6	89,3	132	265
Messung 3	66,2	73,8	120	247
Mittelwert	66,2	89,4	127,0	303,3
Standardabweichung:	3,4	15,6	6,2	82,5

Flächenrauheit  $S_q$  in nm (Teilkreismaske korrigiert)

Fluenz [ $J/cm^2$ ]	1,8	2,6	4,2	7,6
Messung 1	65,0	88,6	156,0	171,0
Messung 2	62,0	89,4	112,0	110,0
Messung 3	60,8	88,6	118,0	169,0
Mittelwert:	62,6	88,9	128,7	150,0
Standardabweichung:	2,2	0,5	23,9	34,7



**A14**

## Gemessene Flächenrauheiten vor und nach der Trockeneisreinigung

Sq [nm] vor der Trockeneisreinigung					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
Messung 1	71,3	158	181	158	241
Messung 2	84,1	156	181	155	288
Messung 3	84,8	136	198	104	358
Mittelwert	80,1	150,0	186,7	139,0	295,7
Standardabweichung:	7,6	12,2	9,8	30,3	58,9
Sq [nm] nach der Trockeneisreinigung					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
Messung 1	49,2	56,4	63,1	113	202
Messung 2	51,6	55,1	76,5	109	173
Messung 3	54,3	54,7	75,4	101	219
Mittelwert	51,7	55,4	71,7	107,7	198,0
Standardabweichung:	2,6	0,9	7,4	6,1	23,3

**A15**

## Gemessene Flächenrauheiten vor und nach dem Ionenstrahlpolieren mit der Kaufmannioninquelle

Sq vor [nm]	ÜLP in %	95	96	97	98	99
Feld 1	Messung 1	51,8	46,5	51,5	89,7	268
	Messung 2	52,4	45,7	59,3	125	286
	Messung 3	47,1	51,7	51,8	125	230
Feld 2	Messung 1	51,7	57	69,9	109	238
	Messung 2	54,9	76,3	84,6	109	290
	Messung 3	46,2	69,2	82,7	103	309
	Mittelwert:	50,7	57,7	66,6	110,1	270,2
	Standardabweichung:	3,3	12,5	14,8	13,5	31,0

Sq nach [nm]	ÜLP in %	95	96	97	98	99
Feld 1	Messung 1	36,4	43,3	23,5	101	186
	Messung 2	35,4	44,5	23,4	82	201
	Messung 3	38,8	20	23,9	106	188
Feld 2	Messung 1	40	43,7	49,6	81,2	158
	Messung 2	38,4	39,5	56,6	89,4	167
	Messung 3	43,8	42,6	57,6	87,8	180
	Mittelwert:	38,8	38,9	39,1	91,2	180,0
	Standardabweichung:	3,0	9,4	17,2	10,1	15,5

**A16**

Gemessene Flächenrauheiten vor und nach dem Ionenstrahlpolieren mit der HF-Ionenquelle bei 80° Einfallswinkel

Sq [nm] vor Ionenstrahlpolieren					
H [J/cm²]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	44,5	116	180	319	348
Messung 2	62,5	145	204	353	330
Messung 3	51,6	134	176	360	346
Mittelwert	52,9	131,7	186,7	344,0	341,3
Standardabweichung:	9,1	14,6	15,1	21,9	9,9

Sq [nm] nach 2 min Ionenstrahlpolieren					
H [J/cm²]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	69,3	160	140	239	221
Messung 2	68,6	150	146	201	323
Messung 3	72,1	128	167	225	217
Mittelwert	70,0	146,0	151,0	221,7	253,7
Standardabweichung:	1,9	16,4	14,2	19,2	60,1

Sq [nm] nach 10 min Ionenstrahlpolieren					
H [J/cm²]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	77,5	129	127	181	252
Messung 2	71	108	129	181	259
Messung 3	66,4	119	128	182	230
Mittelwert	71,6	118,7	128,0	181,3	247,0
Standardabweichung:	5,6	10,5	1,0	0,6	15,1

Sq [nm] nach 20 min Ionenstrahlpolieren					
H [J/cm²]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	77,9	122	138	158	242
Messung 2	75,5	121	138	159	216
Messung 3	76,7	119	140		199
Mittelwert	76,7	120,7	138,7	158,5	219,0
Standardabweichung:	1,2	1,5	1,2	0,7	21,7

**A17**

Gemessene Flächenrauheiten vor und nach dem Ionenstrahlpolieren mit der HF-Ionenquelle bei 85° Einfallswinkel

Sq [nm] nach 20 min Ionenstrahlpolieren					
H [J/cm <sup>2</sup> ]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	77,9	122	138	158	242
Messung 2	75,5	121	138	159	216
Messung 3	76,7	119	140		199
Mittelwert	76,7	120,7	138,7	158,5	219,0
Standardabweichung:	1,2	1,5	1,2	0,7	21,7

Sq [nm] nach 20 min bei 80° und 10 min bei 85° Einfallswinkel					
H [J/cm <sup>2</sup> ]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	57,6	99,6	121	136	185
Messung 2	61,9	103	116	141	199
Messung 3	63	105	121	137	156
Mittelwert	60,8	102,5	119,3	138,0	180,0
Standardabweichung:	2,9	2,7	2,9	2,6	21,9

Sq [nm] nach 20 min bei 80° und 20 min bei 85° Einfallswinkel					
H [J/cm <sup>2</sup> ]	0,63	1,06	1,89	3,03	5,00
Messung 1	63,1	96,9	119	135	196
Messung 2	67,9	102	115	141	207
Messung 3	70	104	118	133	198
Mittelwert	67,0	101,0	117,3	136,3	200,3
Standardabweichung:	3,5	3,7	2,1	4,2	5,9

**A18**

## Gemessene Flächenrauheiten vor und nach dem Ätzen

Sq [nm] vor Ätzen					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
<b>Messung 1</b>	44,9	66,5	85,5	121	210
<b>Messung 2</b>	43,6	65,4	66,8	102	175
<b>Messung 3</b>	42,3	66,2	93,9	141	186
<b>Mittelwert</b>	43,6	66,0	82,1	121,3	190,3
<b>Standardabweichung:</b>	1,3	0,6	13,9	19,5	17,9

Sq [nm] nach 10min KOH					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
<b>Messung 1</b>	43,6	62,5	83,8	125	151
<b>Messung 2</b>	45,5	64,7	87,1	96,9	176
<b>Messung 3</b>	45,5	62,1	85,2	78,1	175
<b>Mittelwert</b>	44,9	63,1	85,4	100,0	167,3
<b>Standardabweichung:</b>	1,1	1,4	1,7	23,6	14,2

Sq [nm] nach 20min KOH					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
<b>Messung 1</b>	44,1	64	86,4	73,1	187
<b>Messung 2</b>	41,7	61,5	84,3	127	182
<b>Messung 3</b>	42,5	62,7	82,3	125	178
<b>Mittelwert</b>	42,8	62,7	84,3	108,4	182,3
<b>Standardabweichung:</b>	1,2	1,3	2,1	30,6	4,5

Sq [nm] nach 30min KOH					
ÜLP	95%	96%	97%	98%	99%
<b>Messung 1</b>	42,9	71,1	87,9	105	181
<b>Messung 2</b>	42,9	54	78,7	127	194
<b>Messung 3</b>	45,2	53,6	82,3	81,6	200
<b>Mittelwert</b>	43,7	59,6	83,0	104,5	191,7
<b>Standardabweichung:</b>	1,3	10,0	4,6	22,7	9,7

## **Eigenständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Crostat, 26.08.2015